

L'idée de la méthode est de partir d'une classe de stratégies intéressantes C et d'opérer une transformation systématique de toutes les stratégies de la classe, ce qui donne une classe C' . Nous avons introduit deux méthodes d'adoucissement et deux méthodes d'endurcissement. Quand on applique une méthode d'adoucissement à une stratégie Str , on obtient une stratégie identique à Str ou moins agressive. De même, appliquer une méthode d'endurcissement conduit à des stratégies inchangées ou plus agressives.

L'adoucissement-1 consiste à partir d'une stratégie Str et à définir la stratégie transformée Str' suivante : au premier coup, Str' coopère, et elle continue de coopérer tant que l'adversaire n'a pas trahi ; dès que l'adversaire a trahi, Str' se met à jouer comme Str aurait joué. La stratégie Str' a donc un comportement identique à celui de Str , sauf qu'elle ne l'applique que lorsque l'adversaire a pris l'initiative de trahir. Bien sûr, si on part d'une stratégie Str initialement coopérative, Str' lui est identique.

La méthode d'endurcissement-1 est symétrique de la méthode d'adoucissement-1 : Str' trahit tant que l'autre n'a pas coopéré, et se met à jouer comme Str dès que l'autre a coopéré. Cette transformation rend initialement agressives les stratégies Str qui ne le sont pas, et ne change pas celles qui le sont.

L'adoucissement-2 permet d'explorer une autre façon de rendre plus coopérative une stratégie quelconque. Quand on l'applique à une stratégie Str , on obtient une stratégie Str' qui se comporte comme Str à la nuance près que si au coup $n-1$ l'adversaire a coopéré, Str' choisit toujours de coopérer. En clair, même quand Str veut trahir, Str' renonce et coopère à la condition que l'adversaire ait accepté de coopérer au coup $n-1$. Str' est une version indulgente de Str , elle est prête à pardonner (sur la base du coup $n-1$) à tout adversaire qui se montre coopératif, et ce quel que soit le passé des interactions. On définit symétriquement l'endurcissement-2.

Si l'on reprend les 17 stratégies de l'encadré pages 82-83, l'application des deux méthodes d'adoucissement et des deux méthodes d'endurcissement produit un total de $5 \times 17 = 85$ stratégies. L'encadré page ci-contre indique les résultats : *a)* s'adoucir est une bonne idée, qui améliore l'efficacité

moyenne des stratégies ; *b)* s'endurcir donne parfois un meilleur résultat immédiat (c'est-à-dire en tournoi), mais, si cela permet une certaine réussite en début d'évolution, c'est nuisible sur le long terme ; *c)* l'endurcissement 1 est, de toutes les transformations envisagées, la plus catastrophique.

Pour les longues rencontres où agit une forme de sélection naturelle, pratiquer l'adoucissement-1 (cela concerne le début des face-à-face) et même l'adoucissement-2 (qui, lui, produit des effets tout le long des face-à-face) est bénéfique. Il ne faut pas durcir votre comportement, et surtout pas au début.

Pour conforter cette analyse, on a souhaité faire des simulations avec des ensembles de stratégies constitués de façon systématique et ne pouvant donc être sujet d'aucun biais subjectif. Une expérience impliquant 5 120 stratégies a été menée. On fait jouer les unes contre les autres les 1 024 stratégies de la classe Mémoire [1, 2], et leur versions modifiées par les quatre transformations précédemment citées. Les résultats sont indiqués dans l'encadré page ci-contre.

Après trente ans d'études, une conclusion claire

D'autres expériences confirment que dans un monde où l'évolution joue son rôle en renforçant les effectifs des stratégies qui réussissent aux dépens de celles qui obtiennent des scores médiocres, alors les comportements coopératifs sont indubitablement les meilleurs. Il est particulièrement important de bien débiter les interactions, en coopérant aussi systématiquement que possible dans les premiers échanges d'un face-à-face. De plus, dans le déroulement d'une interaction, savoir être indulgent est globalement payant. Un renforcement de la sévérité, à condition qu'il ne s'applique pas aux débuts des face-à-face est parfois utile, mais moins payant que l'adoucissement.

Il est remarquable qu'après plus de trente ans d'études et la mise au point d'outils de simulations massives, un jeu à la définition aussi simple que le dilemme itéré du prisonnier produise encore des résultats nouveaux, clairs et précis sur la façon dont il faut aborder les problèmes de la coopération. ■

■ LES AUTEURS



Jean-Paul DELAHAYE et Philippe MATHIEU sont professeurs à l'université de Lille et chercheurs au laboratoire CRISTAL (Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille).

■ BIBLIOGRAPHIE

P. Mathieu et J.-P. Delahaye, *New winning strategies for the iterated prisoner's dilemma*, *Proc. of the 2015 Int. Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2015 (<https://hal.inria.fr/hal-01199149>).

J.-P. Delahaye, *Le dilemme du prisonnier et l'illusion de l'extorsion*, *Pour la Science*, n° 435, pp. 78-83 janvier 2014, .

C. Hilbe et al., *Evolution of extortion on Iterated Prisoner's Dilemma games*, *PNAS*, vol. 110(17), pp. 6913-6918, 2013.

W. Press et F. Dyson, *Iterated Prisoner's Dilemma contains strategies that dominate any evolutionary opponent*, *PNAS*, vol. 109(26), pp. 10409-10413, 2012.

B. Beaufils et al., *Our meeting with gradual, A good strategy for the iterated prisoner's dilemma*, *Artificial Life V*, C. G. Langton et K. Shimohara (eds.), pp. 202-209, MIT Press/Bradford Books, 1996.



Retrouvez la rubrique
Logique & calcul sur
www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Antman, petit mais costaud !

Réduire sa taille à volonté, faire des bonds spectaculaires, communiquer avec les fourmis, Antman peut-il réaliser de tels exploits en respectant les lois du monde atomique et de la physique quantique ?

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER

Illustration : Marc BOULAY

Un nouveau superhéros a débarqué sur nos écrans. Son pouvoir ? La capacité de rétrécir à la taille d'une fourmi grâce à une combinaison spéciale et une « formule » mises au point par le scientifique Hank Pym. Dans *Antman* (2015), Marvel Studios s'écarte de ses superhéros classiques pour mettre en scène un ancien cambrioleur, Scott Lang, qui, voulant récupérer le droit de voir sa fille, se retrouve embarqué dans une folle aventure.

L'idée de raconter les aventures d'un humain rétréci n'est pas récente, à l'image des romans *Les voyages de Gulliver*, de Jonathan Swift (1726), et *L'homme qui rétrécit*, de Richard Matheson (1956).

Le cinéma n'est évidemment pas en reste. En 1966, Richard Fleischer réalise *Le voyage fantastique*, qui relate les aventures d'une équipe de chirurgiens envoyés, à bord d'un sous-marin microscopique, dans le sang d'un patient afin de mener dans son cerveau une opération impossible à réaliser de l'extérieur. Plus près de nous, le film *Chérie, j'ai rétréci les gosses !* (1989) narre les aventures d'un inventeur excentrique dont les enfants font les frais de sa machine à rétrécir les objets.

Les superhéros ont, eux aussi, eu le droit de visiter le monde microscopique dès 1940 avec Atom. Il sera rejoint plus tard par Antman et Wasp (la Guêpe).

Dans tous les cas, l'exploration du monde microscopique donne lieu à des aventures extraordinaires et il est assez plaisant de

se mettre à la place de personnages aux prises avec un univers surdimensionné. Mais que se passerait-il vraiment si nous devenions subitement aussi petits qu'une fourmi ? La physique et la biologie peuvent répondre à cette question.

Le concepteur du costume d'Antman, Hank Pym, explique le principe de son invention par une diminution de l'espace entre les atomes. Un atome mesure quelques dixièmes de milliardième de mètre, mais son noyau est 100 000 fois plus petit ! Ainsi, l'idée de Pym semble bonne : réduire la taille d'un atome, dont le volume est essentiellement vide, devrait permettre de réduire la taille d'un objet.

Mais l'argument de Pym ne tient pas. La taille d'un atome n'est pas arbitraire, elle résulte d'un équilibre physique subtil entre les électrons et le noyau atomique. Hank Pym semble oublier une règle de la physique quantique : un électron confiné est d'autant plus agité que le volume de confinement est petit. Pourquoi l'électron ne se rapproche-t-il pas plus du noyau ? Parce que cela reviendrait à le confiner dans un volume de plus en plus restreint, donc à augmenter sa vitesse.

Plus précisément, la vitesse de l'électron étant inversement proportionnelle à la taille de la « boîte atomique », son énergie de mouvement, qui varie comme le carré de la vitesse, sera inversement proportionnelle au carré de cette taille. Dans le même temps, pour maintenir la cohésion de l'atome, l'énergie de liaison électrostatique entre le noyau



ANTMAN DÉFIE LES LOIS de la physique. Grâce à sa combinaison, il réduit sa taille à celle d'un insecte et chevauche une fourmi ailée qui lui sert de destrier.



DANS UN UNIVERS KAFKAÏEN, si Antman était issu d'un croisement entre un homme et une fourmi, ressemblerait-il à cette créature qui rappelle le personnage incarné par Jeff Goldblum dans le film *La Mouche* (1986, D. Cronenberg) ?

et l'électron varie en proportion inverse de la taille de l'atome. Bilan : lorsque l'on rétrécit l'atome, l'énergie de mouvement croît plus vite que l'énergie d'interaction.

La plus grande de ces deux énergies dicte sa loi : si le mouvement est trop rapide, l'atome éclate, si l'énergie de liaison est trop forte, l'atome s'effondre. La configuration d'équilibre est celle qui minimise l'énergie totale, somme des énergies de mouvement et de liaison électrique. Cette condition aboutit à une taille de l'ordre de quelques dixièmes de nanomètre.

Dense comme une étoile

Le processus invoqué pour expliquer la réduction d'Antman implique aussi qu'elle se fait à masse constante. Mais diminuer la taille d'un humain d'un facteur 100 tout en conservant sa masse implique une augmentation considérable de sa masse volumique, d'un facteur un million environ ! Celle d'Antman atteindrait alors une tonne par centimètre cube, soit, en gros, celle d'une étoile de type naine blanche. Dans de tels astres petits et massifs, la matière est comprimée par l'importante gravité de l'astre. Notons aussi que si Antman conserve sa masse, on voit mal comment il peut voyager à dos de fourmi volante.

Admettons malgré tout que le processus de miniaturisation fonctionne et essayons d'imaginer quelles conséquences cela aurait pour notre héros. Ce dernier est capable de

faire des bonds prodigieux. Hank Pym attribue ces performances à la miniaturisation et les compare à celles d'une fourmi, capable de soulever plus de 100 fois sa masse.

Cet argument est correct ! En effet, la force que développent les membres est proportionnelle à l'aire de leur section (celle-ci reflète le nombre de fibres musculaires dans le membre). Comme elle croît ainsi dans deux dimensions, elle est proportionnelle au carré de la taille (linéaire) du corps. En revanche, la masse du corps est proportionnelle à son volume, lequel augmente dans les trois dimensions ; la masse est donc proportionnelle au cube de la taille caractéristique du corps. Il s'ensuit que la force physique croît proportionnellement à la puissance $2/3$ de la masse corporelle.

En vertu de cette loi, on comprend qu'Antman puisse faire des efforts qui, rapportés à sa masse, sont extraordinaires. Mais le super-héros n'égale jamais les fourmis, revêtues d'un squelette très résistant à base de chitine, alors que les os de son squelette interne sont en phosphate de calcium, plus fragile.

Une autre conséquence de ce jeu entre surface et volume porte sur les échanges thermiques. Les animaux à sang chaud (dits homéothermes) perdent de l'énergie, car ils sont souvent plus chauds que le milieu où ils évoluent. Ces pertes se faisant par la surface externe du corps, elles sont proportionnelles à l'aire de ce dernier. Scott Lang perd donc plus d'énergie qu'Antman, environ 100×100 fois plus si leur rapport de taille

est de l'ordre de 100. Par ailleurs, l'énergie nécessaire à maintenir la température interne est produite par une activité métabolique qui se déroule dans le volume du corps, 100^3 fois plus important chez Scott que chez Antman. Finalement, le rapport entre la perte d'énergie par la surface et sa production dans le volume est 100 fois plus faible chez Scott que chez son *alter ego* miniature.

Autrement dit, le rapport entre surface et volume est défavorable aux organismes de petite taille, qui doivent compenser leur plus grande perte d'énergie par une nourriture proportionnellement plus abondante. C'est ce que l'on constate entre la musaraigne étrusque, le plus petit mammifère du monde, et l'éléphant. Dans le cas d'Antman, s'il veut éviter de passer son temps à se nourrir, il faut que son costume assure une isolation thermique très performante !

Dernière caractéristique de notre super-héros : Pym a prévu un casque qui envoie des signaux chimiques pour communiquer et diriger les fourmis : si c'est bien par phéromones que les fourmis communiquent, les diriger toutes est illusoire car les fourmis n'ont ni chef ni hiérarchie. Leur organisation réside dans les connexions multiples entre individus qui agissent uniquement pour le bien commun du groupe. Un modèle dont les humains sont bien éloignés. ■

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. J.-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

ART & SCIENCE

L'art-chéologie

Le passé de l'archéologie se confronte au présent de l'art contemporain à travers plusieurs œuvres. L'idée commune à ces deux disciplines ? Rendre visible ce qui ne l'était pas, ou ne l'était plus.

Loïc MANGIN

Juillet 2015. Les équipes de l'université d'Oxford, en Grande-Bretagne, s'affairent sur le chantier de fouilles du site romain (occupé entre 100 avant notre ère et 43 de notre ère) de Dorchester-on-Thames, au centre de l'Angleterre. Là, derrière les archéologues, une femme épie le moindre de leurs gestes, comme hypnotisée par leur précision, leur répétition, parfois leur apparente absurdité. Cette espionne est Nathalie Joffre, une artiste fascinée par tous ces mouvements !

À partir de ses observations, elle a conçu une sorte de chorégraphie archéologique présentée dans une vidéo intitulée *Apparitions*. Des mimes y reproduisent et interprètent les gestes des archéologues, sortis de leur contexte, leur performance étant multipliée par un jeu d'ombre (*ci-contre, a*).

Cette œuvre est visible au Centquatre-Paris, dans le cadre de l'exposition collective *Matérialité de l'invisible, l'archéologie des sens*. Organisée sous la direction artistique de José-Manuel Gonçalves, la manifestation est le fruit de la collaboration de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (l'Inrap) et de l'ensemble des acteurs du projet NEARCH. Financé notamment par la Commission européenne, ce projet piloté par l'Inrap réunit des instituts de recherche, des universités et des institutions culturelles de onze pays européens. L'objectif est d'explorer et de renforcer les liens entre les citoyens européens, l'archéologie et leur patrimoine culturel.

Dans ce cadre, le Centquatre-Paris a accueilli plusieurs artistes en résidence et en a

également invité d'autres, par exemple Anish Kapoor. L'idée est ici de mettre en avant les relations qu'entretiennent l'archéologie et l'art contemporain face aux questions du temps, de la mémoire, du patrimoine... En voici quelques morceaux choisis.

À travers ses photographies d'éléments osseux, humains ou non (*b*), Julie Ramage revisite les facettes multiples de l'histoire de l'os à Saint-Denis. De fait, la cité des tombeaux des rois de France abrite aussi un artisanat – moins connu – d'objets en os. Avec l'unité d'archéologie de Saint-Denis, l'artiste a ainsi fouillé l'imaginaire anthropologique (religieux, éthique et culturel) qui entoure le squelette.

Le lent gonflement de pois chiches dans l'eau permet au *Tractoichiche* de se déplacer

Agapanthe, un duo formé de Florent Konné et d'Alice Mulliez, a collaboré avec des archéologues de l'Inrap (à La Courneuve et en Guadeloupe). *Amas*, l'une de leurs œuvres présentées, est une installation sculpturale confectionnée à partir de déchets, telles des bouteilles de plastique, enveloppées dans une gangue cristalline de sucre (*c*). Cette dernière symbolise selon les artistes la trace des objets, la même qu'ils auraient dans la terre, et la rendent palpable. Qui plus est, les déchets collectés représentent notre trace actuelle, celle d'une époque désormais reconnue (l'Anthropo-

cène) que d'éventuels archéologues du futur pourraient découvrir dans quelques milliers d'années. Enfin, le choix du sucre n'est pas anodin : il est lui aussi un matériau chargé d'histoire, notamment géopolitique.

Pendant sa résidence NEARCH, Miranda Creswell s'est intéressée à l'évolution des espaces verts en milieux urbains, ceux de Harlow, en Grande-Bretagne, et le parc des Buttes-Chaumont, à Paris. Dans les deux cas, les lieux ont abrité un temple romain et ont sans cesse été remodelés à travers les siècles. Par exemple, le parc parisien fut successivement une carrière de gypse, une décharge, une artillerie avant de devenir le parc actuel. Grâce à ses dessins (*e*), l'artiste rend visible l'histoire de ces paysages.

Enfin, l'artiste issu du monde du cirque Johann Le Guillerm nous invite à revoir notre notion du temps avec trois machines aux mouvements imperceptibles. Chacune utilise une énergie propre. Par exemple, le *Tractoichiche* exploite le gonflement de pois chiches dans l'eau, qui anime des pistons (*d*).

On sort de l'exposition avec l'envie de regarder avec plus d'acuité le monde qui nous entoure. La sensation de l'environnement et du temps qui passe n'est plus la même. On est alors dans l'état d'esprit des archéologues, c'est-à-dire prêt à trouver quelque chose auquel on ne s'attend pas. ■

Matérialité de l'invisible, l'archéologie des sens, Centquatre-Paris, 5 rue Curial, 75019 Paris, du 13 février au 30 avril 2016 (www.104.fr).

a. Nathalie Joffre – b. Julie Ramage – c. Agapanthe (Konné & Mulliez) – d. Philippe Cibille – e. Miranda Creswell