

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

- 7 dossiers rédigés par des chercheurs et des experts sur le sujet
- Une lecture adaptée sur écrans

3,99 €



Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Thema* découvrez aussi



**Commandez et téléchargez
les numéros en pdf**



Pour lire votre numéro, rendez-vous dans votre compte client



boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html

MEHDI MOUSSAÏD

est chercheur en sciences cognitives au sein du Centre de rationalité adaptative, à l'institut Max-Planck de Berlin. Il a récemment publié *Fouloscopie* (HumenSciences, 2019), un essai où il relate tant ses premiers pas de chercheur que les dernières découvertes sur les foules.



Moins la foule est dense, plus elle est imprévisible

Comment organiser les zones urbaines pour que le trafic y soit fluide ? Comment éviter les bousculades meurtrières lors de rassemblements ? Comment lutter contre la propagation des fausses informations ? Toutes ces questions sont au cœur d'une jeune discipline, l'étude des foules, qui commence déjà à fournir des réponses. Petit tour d'horizon avec le « foulologue » Mehdi Moussaïd.

Le 24 septembre 2015, une terrible bousculade à l'entrée du pont Djamarat, à La Mecque, a entraîné près de 2 500 décès, alors que ce pont venait d'être reconstruit à la suite d'un autre mouvement de foule, en 2006, qui avait causé 362 morts. Sait-on pourquoi ces travaux n'ont pas amélioré les choses ?

Malheureusement, on a assez peu d'informations sur ce qui s'est passé ce jour-là, car les autorités saoudiennes sont très opaques sur l'accident. Jusqu'en 2006, l'entrée du pont Djamarat constituait un goulot d'étranglement. Or, en termes de gestion de foule, les goulots d'étranglement sont un enfer. Comme ce sont des endroits où les gens se massent pour passer, à l'instar d'une porte de métro, des pics de densité apparaissent à certains endroits, qui constituent alors autant de zones à risque.

À partir de quelle densité la situation devient-elle dangereuse ?

Depuis l'accident de 2006 et l'étude des films de vidéosurveillance du lieu, on sait qu'il existe des seuils de densité, notamment autour de 6 à 7 personnes par mètre carré, à partir desquels se produisent divers phénomènes collectifs. L'un d'eux, dit de turbulences, est meurtrier : des vagues de bousculades où les gens chutent et subissent des pressions impossibles à encaisser. Depuis cette étude, on recommande donc de toujours maintenir la densité en dessous de ce seuil critique. Mais c'est plus facile à dire qu'à faire : même si la foule est peu nombreuse, il suffit que tout le monde se retrouve au même endroit, comme c'est le cas autour d'un goulot d'étranglement, pour que des accidents se produisent.

À l'entrée du pont Djamarat, jusqu'en 2006, les bousculades étaient fréquentes et souvent meurtrières (comme ce fut le cas en 1994, 1998, 2001, 2003, 2004 et 2006). À partir de ces découvertes, les autorités saoudiennes ont décidé de reconstruire cet endroit pour élargir le goulot d'étranglement. Il existera toujours, car la foule doit se rendre dans un endroit précis – où l'on lapide trois piliers symbolisant Satan –, mais en l'élargissant, on a voulu réduire le risque d'accident. Et force est de constater que cela a plutôt bien fonctionné : entre 2006 et aujourd'hui, la catastrophe de 2015 demeure unique. Néanmoins, une foule reste un système chaotique dont on perd vite le contrôle. Une foule en déplacement est ainsi très difficile à gérer, surtout quand elle rassemble trois millions de personnes dans une ville aussi petite que La Mecque. En 2015, c'est probablement une combinaison de petits facteurs qui a causé l'accident.

Ces recherches sur les films de 2006 ont-elles fait émerger d'autres pistes pour améliorer les flux de foule ?

Une seconde chose effectivement très utile a changé à La Mecque après ces travaux : on a

supprimé les routes bidirectionnelles. Le nouveau pont constitue un circuit tel qu'il n'autorise le déplacement des pèlerins que dans un sens, ce qui fluidifie considérablement le trafic. À l'accident de la Love Parade de Duisbourg, en Allemagne, en 2010, ce sont des flux bidirectionnels qui ont causé l'accident : deux masses humaines arrivaient l'une vers l'autre de deux directions opposées, et le drame s'est produit à l'endroit où elles se sont rencontrées. Dans les heures qui avaient précédé l'accident, les forces de l'ordre s'étaient rendu compte que la foule était trop nombreuse (1,5 million de festivaliers) et dense et qu'elles en perdaient le contrôle. Elles avaient commencé à créer des barrières de sécurité, à rediriger la foule dans certains endroits et, à un moment, par erreur, deux flux se sont retrouvés face à face, produisant un pic de densité qui a entraîné la mort de 21 personnes.

D'une manière générale, la meilleure pratique est que l'événement soit planifié de façon quasi chirurgicale. À La Mecque, cela fonctionne bien : les pèlerins ont maintenant des tickets avec une heure de passage, ce qui permet de contrôler qui est où et à quel moment. Mais en cas d'affluence trop importante dans un festival de musique, bloquer l'entrée est une mauvaise idée : les gens s'accumuleront de l'autre côté, créant un pic de densité à cet endroit.

Que savait-on sur les foules avant 2006 ?

L'année 2006 a vraiment été charnière. Pour la première fois, les chercheurs ont eu accès à des données sur un mouvement de foule meurtrier. Ces données sont arrivées dans le laboratoire de Dirk Helbing, à l'École polytechnique fédérale de Zurich, où j'étais alors doctorant, et c'est grâce à elles qu'on a commencé à comprendre les mouvements de foule et les bousculades. En effet, on avait déjà une bonne connaissance des déplacements des foules en général, mais à une densité moindre, dans un contexte de vie quotidienne – une station de métro, par exemple. Les recherches sur les foules avaient débuté vers le milieu des années 1950, lorsque les villes commençaient à s'engorger. Des ingénieurs urbanistes voulaient comprendre comment les gens se déplacent dans les rues pour mieux adapter l'environnement urbain. Ils ont fait plein d'observations, dont une qui paraît assez intuitive aujourd'hui, sur le rapport entre densité et vitesse de déplacement des individus : plus une foule en mouvement est dense et moins les individus qui la composent se déplacent vite. Toutefois, il leur manquait un cadre théorique pour interpréter plus avant leurs observations. C'est une communauté de physiciens qui l'a apporté dans les années 1970, en particulier l'Australien Leroy Henderson, qui a eu l'idée de considérer qu'une foule dans une rue se comporte comme un liquide dans un tuyau et que l'on peut donc



Mehdi Moussaïd a récemment publié : **Fouloscopie** *Ce que la foule dit de nous* (HumenSciences, 2019).

> modéliser ses mouvements à l'aide de la dynamique des fluides. Cette analogie fonctionnait très bien... tant que la foule était très dense.

À quelle densité ne fonctionne-t-elle plus ?

La limite n'est pas claire, mais on peut faire un découpage grossier : à très forte densité, une foule se comporte comme un fluide. À une densité intermédiaire, ce n'est plus aussi simple. Cependant, dans les années 1990, Dirk Helbing a proposé une autre analogie, où les piétons sont des particules. Avec les fluides, le cadre théorique était celui de l'hydrodynamique. Avec les particules, c'est la mécanique newtonienne, où l'on attribue des forces de répulsion aux individus pour décrire le système (voir l'article page 32). Et quand on descend encore en densité, le modèle particulaire marche à son tour beaucoup moins bien. Il faut alors un autre cadre théorique : les sciences comportementales, principalement la psychologie et l'éthologie humaine. C'est ce que j'ai montré durant mon doctorat : dans un cadre quotidien, le modèle des piétons-particules n'a pas vraiment de sens. Il faut plutôt regarder comment les gens se comportent. C'est d'ailleurs fascinant qu'il faille ainsi passer d'une discipline à l'autre pour étudier les foules, et que cela ne dépende que de l'augmentation d'un paramètre, la densité. Au laboratoire, nous essayons justement de caractériser ces transitions et les comportements des foules dans les différents régimes.

Comment étudie-t-on le comportement d'une foule, concrètement ?

On a surtout parlé de théorie, mais la partie observationnelle est aussi très importante. On procède de deux façons. D'une part, dans la rue, en « milieu naturel ». C'est ce que j'ai beaucoup fait pendant ma thèse : on part avec une caméra et un trépied et on cherche un endroit très fréquenté, on se positionne un peu en hauteur et on filme les passants, puis, de retour au laboratoire, on suit le déplacement des gens et on regarde si les modèles reproduisent ces observations. D'autre part, on organise des expériences, certes plus artificielles, mais avec un bien meilleur contrôle sur ce qui se passe. On commence par se poser une question. Par exemple, comment se structurent deux flux de piétons qui se déplacent en sens opposé ? Et on conçoit une expérience pour y répondre. En l'occurrence, nous avons construit un couloir circulaire (cela nous permettait de maintenir les flux de piétons sans avoir à en rajouter) où nous avons placé des groupes de 30, 50 ou 60 participants. À chaque fois, une moitié avait pour instruction de tourner dans un sens, l'autre dans l'autre sens, tout en étant mélangées. Au départ, la foule était complètement désorganisée, mais après une vingtaine de secondes, elle s'autoorganisait spontanément :

une « autoroute de piétons » apparaissait, caractérisée par le fait que tous les gens qui allaient dans un même sens occupaient une moitié de l'espace disponible, tandis que l'autre moitié était réservée au sens opposé. Comme si la foule avait décidé de se partager l'espace. On peut y voir une forme d'intelligence collective : cette organisation a émergé par simples interactions successives, sans même que les gens ne s'en rendent compte, et a conduit à un bien meilleur trafic piétonnier.

Les participants privilégiaient-ils un côté ?

Oui, ils marchaient presque toujours à droite. Pour comprendre pourquoi, on a fait une autre expérience, où cette fois deux piétons se croisent dans un couloir droit. On voulait voir comment ils s'évitent. On s'est aperçu que dans cette situation, les piétons s'évitent principalement par la droite, sans même communiquer. Une sorte de règle implicite – on parle de convention sociale – facilite l'évitement entre les deux piétons. Cette règle diffère d'un pays à l'autre. Dans certains, comme la France, on s'évite par la droite ; dans d'autres, comme l'Australie ou le Japon, par la gauche. C'est ce biais d'évitement à l'échelle d'un piéton qui crée la structure de l'« autoroute » : si les piétons s'évitent par la droite, l'autoroute apparaît à droite, et inversement. Est-ce en rapport avec la façon dont roulent les voitures ? Presque toujours, mais il y a des exceptions. À Londres, les gens marchent à droite et les voitures roulent à gauche.



© Muhammad Fala'ah Interim/Getty

Sait-on pourquoi ?

On a compris que la préférence d'évitement des piétons provient juste d'une habitude de notre cerveau d'apprendre à chaque expérience de la vie. Si en évitant quelqu'un par la gauche, vous lui rentrez dedans, votre cerveau retiendra qu'il faudra passer à droite la prochaine fois. Et si, en l'évitant par la droite, tout va bien, votre cerveau retiendra aussi l'information. Quand cet apprentissage, dit par renforcement, se met en place chez tous les individus en même temps de façon répétée, peu à peu, la population s'accorde sur un côté d'évitement. C'est ainsi qu'apparaissent les normes et les conventions sociales, comme le nombre de bises en fonction des régions de France. Il se trouve que le code de la route influe sur nos préférences d'évitement. C'est pour cela qu'on

Un ou deux individus plus rapides suffisent à réduire la vitesse de tous les piétons

observe une corrélation entre trafic automobile et comportement des piétons. Mais la corrélation n'est pas parfaite. En particulier, en Angleterre, qui est en quelque sorte une enclave où les véhicules roulent à gauche, entourée de pays où l'on roule à droite, il y a probablement conflit entre l'effet des pays voisins sur les piétons et l'effet des automobilistes.

Il arrive qu'un individu aille plus vite ou plus lentement. Cela a-t-il un effet sur le flux des piétons ?

Dans une foule où tout le monde s'accorde à peu près pour marcher à la même vitesse, élevée ou non, les autoroutes de piétons se mettent en place, fluidifient le trafic et tout va bien. Mais si quelques individus décident d'aller vite ou plus lentement, cela ne fonctionne plus. Ceux qui vont vite ont tendance à doubler, ce qui crée une perturbation : ils se retrouvent en face du flux opposé, lequel se scinde en deux, ce qui déclenche une réaction en chaîne qui, de proche en proche, dissout toute l'organisation. Puis l'autoroute réapparaît un peu plus tard, et disparaît à nouveau : elle devient instable, ce qui réduit la qualité du trafic. En fait, un ou deux individus

suffisent à réduire la vitesse de marche de tout le monde en doublant, quel que soit le nombre de personnes sur l'autoroute de piétons.

Retrouve-t-on des comportements similaires chez les animaux ?

En effet. Quand j'étais doctorant à l'université Paul-Sabatier, à Toulouse, je travaillais dans un laboratoire d'éthologie, sous la direction de Guy Théraulaz, et mes collègues étudiaient des troupeaux de moutons, des bancs de poissons, des fourmis... Dans les colonies de fourmis, ils ont ainsi observé que se met parfois en place un trafic bidirectionnel du même ordre que celui des piétons, avec des fourmis qui quittent leur nid à la recherche d'une source de nourriture et d'autres qui ont trouvé une telle source et reviennent les mandibules chargées. Sur ces pistes de fourragement, les fourmis s'organisent elles aussi en autoroutes, avec cette fois un flux qui passe au milieu de l'autre. Les mécanismes sont un peu différents, mais la structuration collective est sensiblement la même : contrairement aux piétons, les fourmis qui vont dans un sens et celles qui vont dans l'autre ne sont pas les mêmes. Les fourmis du flux central rentrent à la fourmilière chargées de nourriture, tandis que les autres ne portent rien. On peut imaginer cette situation dans une gare : les gens qui portent une valise ont moins la possibilité de tourner et se retrouvent vers le centre, alors que ceux qui ne portent rien sont plus libres de leurs mouvements et se retrouvent sur les côtés.

Avec toutes ces découvertes, connaît-on assez bien les foules à présent pour les modéliser de façon satisfaisante ?

On les connaît de mieux en mieux, mais jamais parfaitement. En fait, cela dépend de la question que l'on se pose. On réussit plutôt bien à modéliser le trafic piétonnier dans une ville. On sait aussi repérer les zones de danger lors d'un grand rassemblement. Mais moins la foule est dense, plus elle est imprévisible. Cela paraît paradoxal, mais c'est assez normal. Quand la foule est très dense, la liberté de mouvement de chacun est quasiment nulle. Le comportement de chaque individu devient ainsi beaucoup plus facile à prédire que dans un groupe de quelques personnes, où chacun a une grande liberté de mouvement. Les algorithmes sont ainsi très efficaces à forte densité. D'ailleurs, les entreprises comme la start-up bretonne Golaem reproduisent très bien des foules de synthèse pour des films et des séries. Golaem, par exemple, a participé à la mise en synthèse des foules des trois dernières saisons de *Game of Thrones*.

Inversement, ces modélisations vous aident-elles dans vos recherches ?

Oui, beaucoup. On fait sans cesse des allers-retours entre modélisation et observation. ➤



La foule de pèlerins qui se rassemble chaque année à La Mecque est particulièrement dense (ci-contre le 6 janvier 2006). Le 12 janvier 2006, lorsque la bousculade qui a causé 632 morts s'est produite à l'entrée du pont Djamarat, qui conduit aux trois piliers de Satan, certaines zones de cette entrée comptaient jusqu'à neuf personnes par mètre carré, soit l'équivalent de 14 personnes dans une baignoire...

> Typiquement, à un moment donné, un modèle simule le monde réel. On organise alors une expérience pour tester ses prédictions. Si cela ne fonctionne pas, on modifie le modèle en conséquence et on le teste à nouveau. Dans le couloir circulaire, par exemple, le modèle prédisait que des autoroutes de piétons apparaîtraient au bout d'une vingtaine de secondes et persisteraient. De fait, dans l'expérience, les autoroutes se sont formées au moment annoncé. Sauf qu'elles se dissolvaient au bout d'un moment à cause des vitesses de marche. On ne comprenait pas ce qui posait problème. En fait, cet effet des piétons rapides ou lents n'était pas pris en compte dans le modèle. On l'a donc intégré et on a réussi à reproduire cette instabilité dans les prédictions.

Sur quoi travaillez-vous plus spécifiquement en ce moment ?

Sur la fréquence des mouvements de panique comme ceux qui se sont produits deux jours après l'attaque du Bataclan, sur la place de la République, ou le 10 juillet 2018 à Nice, sur le cours Saleya, la principale voie piétonne, pendant la retransmission d'un match de foot, ou encore le 23 mars dernier à Disneyland Paris. Le scénario est toujours le même : une fausse alerte, et tout le monde se met à fuir dans une certaine direction. Ces mouvements sont assez dangereux, car ils créent des pics de densité. On essaye de comprendre pourquoi on observe une recrudescence des mouvements de panique. C'est clairement à cause des récentes vagues d'attentats terroristes. On veut savoir combien de temps cette mémoire collective des attentats perdure avant que les mouvements de panique ne s'arrêtent. Le risque qu'il y ait un accident à cause de la foule est à mon avis plus important que celui d'un attentat terroriste.

Au regard des connaissances actuelles, quels conseils donneriez-vous pour s'en sortir dans un mouvement de foule ?

Le premier conseil est de partir avant qu'il ne soit trop tard. Souvent, on perçoit qu'on se sent mal, mais on ne voit pas le danger et on continue d'avancer. Or, à ce moment-là, il est encore temps de se faufiler pour partir. Ensuite, la majorité des victimes meurent d'asphyxie. Les premières se retrouvent le long des parois solides, où elles ne peuvent plus suivre le mouvement et sont compressées. Il faut donc éviter d'être près d'un mur ou d'un grillage. Par ailleurs, en cas de compression extrême, replier ses bras contre sa cage thoracique, comme un boxeur, peut donner quelques centimètres aux poumons pour respirer. Il est aussi important de ne pas tomber, car il est alors très difficile de se relever. Enfin, un réflexe, quand on est bousculé par ses voisins, est de les repousser. Or, d'un point de vue physique, cela a tendance

Le QI n'est pas du tout déterminant pour la performance d'un groupe

à amplifier le phénomène. Au contraire, il faut se laisser porter par la foule en tâchant, toujours, de rester sur ses jambes.

Vous vous intéressez par ailleurs à la contagion sociale, c'est-à-dire à la propagation de l'information dans une foule, en l'occurrence via les réseaux sociaux. Détecte-t-on aussi des lois ?

Oui, des modèles apparaissent depuis les années 2000, qui cherchent à anticiper si une information va se propager loin ou non, et notamment à décrire ce qui fait que telle personne partage une information et la propage. L'arrivée des réseaux sociaux a bouleversé ces recherches. On disposait soudain d'une énorme quantité de données. Au début, les chercheurs ont beaucoup utilisé Facebook, mais depuis les scandales d'intrusion dans la vie privée, l'accès aux données de ce réseau est réservé à son centre de recherche, qui ne divulgue que très peu ses résultats. En revanche, d'autres réseaux sociaux comme Twitter, où les gens cherchent à communiquer au plus grand nombre, sont publics par définition. On peut donc y étudier la propagation des informations. On s'est ainsi aperçu que dans la majorité des cas, une information ne se propage pas. À cause du flux qui submerge les utilisateurs, elle s'éteint dès son introduction sur le réseau. En revanche, quelques-unes déclenchent des cascades dont on sait reconstruire le chemin. En 2018, Soroush Vosoughi, de l'institut de technologie du Massachusetts, et ses collègues, ont ainsi montré que les vraies et fausses informations se propageaient différemment.

Ils ont collecté environ 126 000 informations tweetées par quelque 3 millions de personnes et, avec l'aide d'un site de *fact-checking*, ont séparé les vraies des fausses. Ils se sont ainsi rendu compte que les cascades de propagation diffèrent beaucoup d'une catégorie à l'autre. Celles des fausses informations ressemblent à une chaîne : plus grandes et plus longues, elles propagent plus vite l'information. Celles des vraies informations, plus petites et propageant moins vite l'information, s'apparentent plus à un émetteur, qui touche



Pour étudier les flux bidirectionnels de piétons, l'auteur et ses collègues effectuent des expériences où ils demandent à des participants de marcher dans un couloir circulaire.

plein de monde en même temps, mais de façon horizontale. Cela a permis de développer des programmes automatisés qui repèrent si une information se propage comme un mensonge ou comme une vérité. Des chercheurs essaient à présent d'affiner ces modèles pour identifier ce qui est vrai et faux, dès le début d'une cascade. On essaye aussi de comprendre comment une information se déforme.

C'est-à-dire ?

Nous nous sommes intéressés à la distorsion de l'information. Au fil de sa propagation, une information se transforme. En 2015, nous avons montré que cette distorsion n'est pas aléatoire : elle est fortement influencée par ce que pensent les gens qui transmettent l'information. L'expérience consistait à suivre la propagation d'un message, constitué d'informations neutres sur les risques et bénéfices d'un agent antibactérien très utilisé mais controversé, le triclosan, par des chaînes de bouche-à-oreille. À l'aide de questionnaires préalables, nous avons créé deux types de chaînes : les unes étaient constituées de gens ayant des préjugés contre l'industrie pharmaceutique et les produits chimiques, les autres de gens sans de tels préjugés. Résultat, dans les chaînes de gens avec des préjugés, le message devenait de plus en plus alarmant, alors qu'il devenait rassurant dans les autres. Par ailleurs, actuellement, nous nous intéressons aux chaînes de propagation qui lancent des défis, souvent dangereux, aux adolescents, et aux mécanismes de leur succès.

Cela paraît stupide. Pourtant, on parle d'intelligence des foules ?

Autant que de stupidité des foules. Quand une foule se rassemble, que ce soit physiquement ou virtuellement sur le Web, elle amplifie tout, que ce soient les émotions, les jugements ou les comportements. Comme on retient davantage les choses négatives, on a tendance à parler plus de bêtise collective que d'intelligence,

mais cela marche dans les deux sens. Demandez à une centaine de personnes la hauteur de la tour Eiffel et calculez la médiane ou la moyenne de leurs estimations, vous obtiendrez une valeur très proche de la valeur réelle. C'est un effet statistique assez facile à comprendre : si vous allez dans la rue, vous avez autant de chance de tomber sur quelqu'un qui surestimerait la valeur d'un certain écart que sur quelqu'un qui la sous-estimerait du même écart. Donc si vous interrogez plein de gens, leur répartition de part et d'autre de la bonne valeur sera équilibrée. Bien sûr, les jugements doivent être indépendants, sinon, on entre dans des phénomènes de l'ordre de la décision collective. Dans ce domaine, Anita Woolley, de l'université Carnegie-Mellon, aux États-Unis, et ses collègues, ont mené une étude fascinante en 2010. En demandant à des groupes de deux à cinq personnes de même quotient intellectuel (QI) ou de même intelligence sociale (empathie, écoute...) de réaliser diverses tâches, ils ont montré que le QI n'est pas du tout déterminant pour la performance du groupe, contrairement à l'intelligence sociale.

Peut-on évaluer le QI d'une foule ?

C'est ce que nous essayons de faire. Les tests professionnels de QI mesurent différentes facettes de notre intelligence : émotionnelle, mathématique, verbale... Nous aimerions exposer une grande foule à ce type de test et examiner si ses performances diffèrent selon la facette testée. Une foule a-t-elle, par exemple, une forte intelligence émotionnelle et une faible intelligence mathématique ? Des collègues au laboratoire travaillent sur un autre aspect passionnant : ils essaient de voir dans quelle mesure le jugement d'une foule d'étudiants en médecine peut rivaliser avec celui d'un expert pour donner un diagnostic médical. Ils ont ainsi montré que le jugement collectif des étudiants est ni meilleur ni moins bon que celui de l'expert.

Comparez-vous aussi le diagnostic de la foule étudiante avec celui d'une intelligence artificielle ?

Pas encore, mais nous ferons sûrement des expériences dans ce sens un jour. Deux formes d'intelligence émergent dans la littérature scientifique en ce moment : l'intelligence collective et l'intelligence artificielle. À chaque fois, on compare les performances de l'une ou l'autre avec celle d'un expert. Mais peut-être arrivera-t-on un jour à confronter les deux, voire à les fusionner ? La foulescopie, l'étude des foules, est une science jeune et qui avance vite. Il y a encore tout à découvrir ! ■

Propos recueillis par
Marie-Neige Cordonnier

BIBLIOGRAPHIE

S. Motsch et al., **Modeling crowd dynamics through coarse-grained data analysis**, *Math. Biosci. Eng.*, vol. 15(6), pp. 1271-1290, 2018.

S. Vosoughi et al., **The spread of true and false news online**, *Science*, vol. 359, pp. 1146-1151, 2018.

M. Moussaïd et al., **The amplification of risk in experimental diffusion chains**, *PNAS*, vol. 112(18), pp. 5631-5636, 2015.

D. Helbing et H. Z. Al-Abideen, **Dynamics of crowd disasters : An empirical study**, *Phys. Rev. E*, vol. 75, article n°046109, 2007.

L'ESSENTIEL

> La principale difficulté, quand on s'intéresse aux mouvements de foule, réside dans le caractère imprévisible des individus qui la composent.

> Néanmoins, dans certaines situations comme l'évacuation d'une salle par une sortie de secours, les modélisations fonctionnent plutôt bien.

> L'intégration à ces modèles de facteurs psychologiques dynamiques est encore balbutiante, mais le domaine est en pleine ébullition.

> Par ailleurs, avec l'accroissement des données sur les foules, l'approche par intelligence artificielle devient une autre piste prometteuse.

LES AUTEURS



BERTRAND MAURY
professeur au Département de mathématiques et applications de l'École normale supérieure (PSL Université), à Paris



SYLVAIN FAURE
ingénieur de recherche du CNRS au laboratoire de mathématiques d'Orsay



La foule en équations

Imaginez que chaque individu d'une foule soit un pion sur un échiquier, ou encore que la foule soit une goutte qui dévale une montagne le plus vite possible. En s'appuyant sur de telles analogies, des physiciens et mathématiciens ont conçu des modèles de foules performants pour décrire l'évacuation d'un bâtiment ou le transit de passagers dans une gare.



En juillet 2013, un lâcher de taureaux à Pampelune lors des fêtes de San Fermin a mal tourné à cause d'un mouvement de foule mal canalisé.

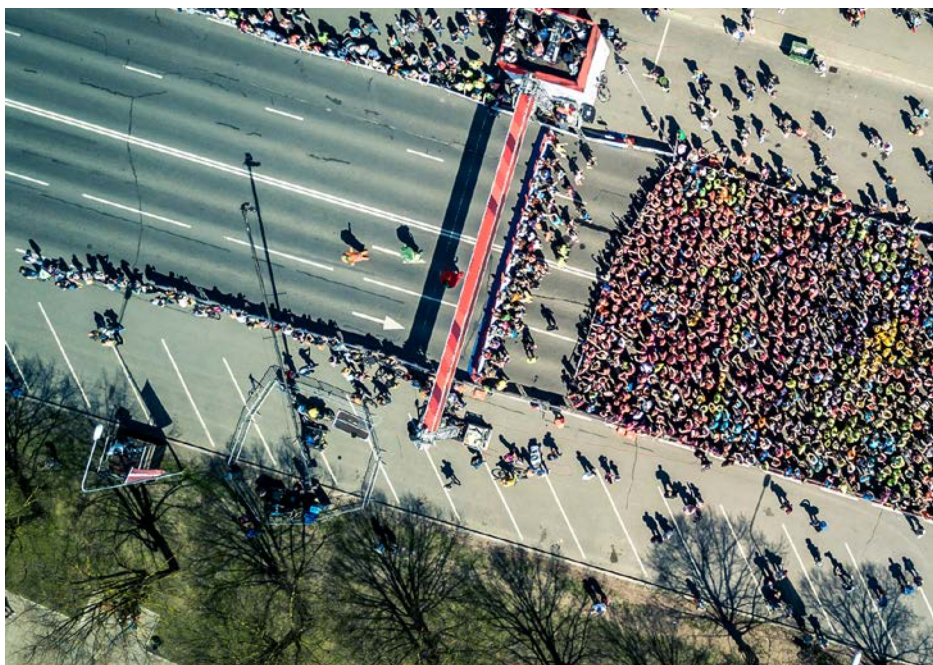
Pampelune, 13 juillet 2013. Comme tous les jours pendant les fêtes de San Fermin, la journée commence par un lâcher de taureaux à travers la ville. Des coureurs volontaires précèdent les animaux, qui avancent à vive allure. Le parcours s'étale sur un petit kilomètre et finit aux arènes, où les taureaux seront combattus. Ce jour-là, cependant, un bouchon humain se forme brusquement devant l'accès aux arènes, piégeant des dizaines de personnes au fond de la ruelle qui y mène. Malgré un accès large de quelques mètres, les acteurs involontaires de ce drame se retrouvent si inextricablement imbriqués que tout effort pour forcer le passage semble contribuer à solidifier l'assemblage apparu spontanément. Bilan : 23 blessés, dont certains gravement.

Il arrive malheureusement aussi que de tels mouvements de foule liés à un goulot d'étranglement soient meurtriers, comme ceux qui se sont produits à l'entrée du pont Djamarat, à La Mecque, encore en 2015, ou sur un pont de Phnom Penh, au Cambodge, en 2010, ou encore à la Love Parade de Duisbourg, en Allemagne, la même année.

Ces dernières décennies, en grande partie pour mieux comprendre ces événements et les éviter, pour assurer la sécurité des personnes dans les lieux fermés (faciliter, par exemple, l'évacuation rapide des bâtiments) et ouverts, comme La Mecque, ou lors de manifestations sportives, culturelles ou politiques, l'étude et la modélisation des foules se sont considérablement développées. Pour appréhender cette matière active très particulière, physiciens, mathématiciens, informaticiens, sociologues, psychologues et éthologues travaillent de concert. Et ces efforts commencent à porter leurs fruits. Aujourd'hui, la modélisation des mouvements de foule intervient dans de nombreux domaines : conception de bâtiments, anticipation de fortes congestions dans les lieux recevant du public, calculs prédictifs de temps d'attente, et jusqu'à la création de scènes virtuelles dynamiques dans les jeux vidéo, les films et les séries.

DES PARTICULES AUX PIÉTONS

Vue de haut, une foule ressemble à un amas de petits grains. Il est alors tentant de considérer les personnes comme un système de particules, surtout quand on est mathématicien ou physicien. En effet, pendant des siècles, les scientifiques ont cherché à comprendre et prédire le mouvement de particules, et les progrès dans le domaine ont été considérables. Le déclic a été la formalisation, au XVII^e siècle, des lois de la mécanique classique par Isaac Newton. Grâce à ces lois très générales, on sait écrire l'équation qui donne



Le départ d'un marathon s'effectue en plusieurs fois. Chaque cohorte de coureurs s'avance à son tour sur la ligne, comme le ferait de l'eau dans un robinet que l'on ouvre et ferme par intermittence.

la position au cours du temps d'une particule soumise à des forces extérieures, ou encore les équations d'un système de particules en interaction, qu'il s'agisse de minuscules grains solides à peine visibles ou de planètes en interaction gravitationnelle.

Certes, les systèmes obtenus à partir de ces lois sont parfois d'une complexité telle qu'il est très difficile de les utiliser pour prédire avec précision le mouvement d'une collection importante de particules. Mais cette difficulté ne remet pas en question la validité des lois de Newton, que l'on utilise ainsi dans de nombreux domaines. Par exemple, ce sont ces mêmes lois fondamentales qui donnent les équations régissant le mouvement de fluides comme l'eau ou l'air. Là encore, ces équations décrivent une réalité extrêmement complexe

La foule serait une goutte dévalant une colline suivant la ligne de plus grande pente



GARDER SES DISTANCES

Tout individu a tendance à maintenir autour de lui une zone de sécurité. Les premiers travaux scientifiques d'ampleur pour formaliser cette tendance et, plus généralement, la façon dont on appréhende son environnement immédiat, remontent au début des années 1950. C'est à cette époque que Heini Hediger, à la fois biologiste et directeur de zoo en Suisse, a estimé précisément la taille de la zone virtuelle considérée par un animal comme « son » espace. L'aspect le plus spectaculaire de ces travaux est sans doute la précision avec laquelle certains animaux – les fauves, par exemple – ont conscience de cette zone d'intimité. Heini Hediger a mis en évidence que le déclenchement d'une réaction de fuite ou d'attaque dépend de la position d'un intrus à quelques centimètres près. Quelques années plus tard, l'anthropologue américain Edward Hall a étendu cette approche aux humains. Il a mis en évidence de façon quantifiée la tendance à maintenir une certaine distance avec son voisin ou interlocuteur, très reproductible d'un individu à l'autre au sein d'un même

groupe culturel. Cette distance dépend essentiellement du degré d'intimité entre les personnes et de leur statut social. Edward Hall rapporte ainsi qu'en 1960 John Kennedy se trouvait dans une grande pièce où il avait l'habitude de retrouver ses proches et diverses personnalités influentes. La rumeur fraîchement propagée dans l'assistance qu'il était destiné à devenir le prochain président des États-Unis conduisit à l'émergence d'une zone de vide autour de lui, d'un rayon d'une dizaine de mètres. Les personnes présentes, pourtant habituées à un contact direct et chaleureux avec le jeune sénateur, ne se sentaient autorisées à franchir la limite de cette zone fictive que sur invitation expresse du futur président lui-même.
B. M et S. F.

et instable, mais leur résolution sur ordinateur est possible. C'est elle qui fournit les prédictions météorologiques auxquelles nous sommes maintenant habitués.

Bref, quand on est mathématicien ou physicien, considérer les individus d'une foule comme des particules est finalement assez naturel. Mais peut-on réellement le faire? En d'autres termes, existe-t-il des lois fondamentales qui régissent le mouvement de ces personnes, comme les lois de Newton pour les particules passives? L'honnêteté intellectuelle force à répondre négativement: la connaissance à un instant donné de la position et de la vitesse de tous les individus d'une foule isolée du reste du monde ne permet manifestement pas de prédire le mouvement futur de ses membres. Aucun observateur extérieur, fût-il Isaac Newton, n'est capable de prédire le demi-tour soudain d'une personne qui se rappelle brusquement qu'elle a oublié son agenda au bureau et rebrousse chemin. Néanmoins, dans certaines situations, il est possible de modéliser le mouvement d'ensemble d'une foule. Bien sûr, de telles modélisations nécessitent de faire des approximations sur le devenir de chaque individu, mais si celles-ci sont judicieuses, elles ne nuisent pas trop à la prédiction du mouvement d'ensemble. Reste à trouver les bons paramètres...

On construit un modèle comme on élabore une recette de cuisine. On choisit les ingrédients, les paramètres qui vont conditionner la qualité gustative du résultat (temps de cuisson, de repos, finesse de la découpe...), et la façon

dont on intègre et combine ces ingrédients. Dans le cas de la modélisation de foules, les ingrédients de base sont les lois élémentaires qui régissent le mouvement d'un individu donné en interaction avec son entourage immédiat (tel qu'il le perçoit).

Le premier ingrédient, commun à tous les modèles, consiste à définir une tendance individuelle, ou « vitesse souhaitée ». Pour une évacuation de bâtiment, on considère par exemple que tout individu aura tendance à suivre le plus court chemin vers la sortie, à une certaine allure, ce qui définit sans ambiguïté la vitesse souhaitée de chacun en fonction de l'endroit où il est.

Le deuxième ingrédient, essentiel, porte sur la description de qui se passe lorsque deux individus sont proches l'un de l'autre. Tant de facteurs psychologiques individuels et socio-culturels régissent ces interactions qu'il est difficile d'ériger une loi valide pour toutes les paires d'individus. Néanmoins, les chercheurs s'entendent pour considérer que, en général, chaque individu a tendance à se maintenir, autant que possible, à une certaine distance de ses voisins, distance qui dépend essentiellement du degré d'intimité entre les deux individus concernés (*voir l'encadré ci-dessus*).

Une fois les ingrédients rassemblés, il s'agit de choisir un cadre dans lequel les incorporer. En général, ce cadre est fourni par une analogie avec un système physique ou mathématique déjà bien décrit. Dans le cas des ➤

> foules, des physiciens et des mathématiciens ont proposé plusieurs approches ces dernières décennies. Dans certaines, dites microscopiques, on suit individuellement toutes les personnes, qui sont de fait identifiées à des particules (mais aux propriétés particulières, données par nos deux ingrédients). Dans d'autres, dites macroscopiques, on décrit la foule comme un continuum – un liquide qui s'écoule et se déforme sous l'action de forces externes et internes.

PRENDRE EN COMPTE LES FORCES SOCIALES

C'est un physicien allemand, Dirk Helbing, à l'École polytechnique fédérale de Zurich, qui, en 1995, a proposé le premier modèle mathématique de foule – qui était aussi le premier modèle microscopique de foule. Dans les années 1970, le physicien australien Leroy Henderson avait eu l'idée de décrire les flux de piétons dans une rue à l'aide de la mécanique des fluides, et cette analogie avait enthousiasmé la communauté de physiciens qui s'intéressaient au sujet. De fait, elle fonctionne particulièrement bien pour les mouvements simples de foule assez dense – une manifestation dans les rues d'une ville, par exemple, ou même les déplacements des coureurs au départ d'un marathon, comme l'ont montré il y a quelques mois Nicolas Bain et Denis Bartolo, de l'École normale supérieure de Lyon.

Au début de plusieurs marathons, les deux physiciens ont filmé du dessus la zone où des cordons d'organiseurs guident les coureurs



AUTOMATE CELLULAIRE

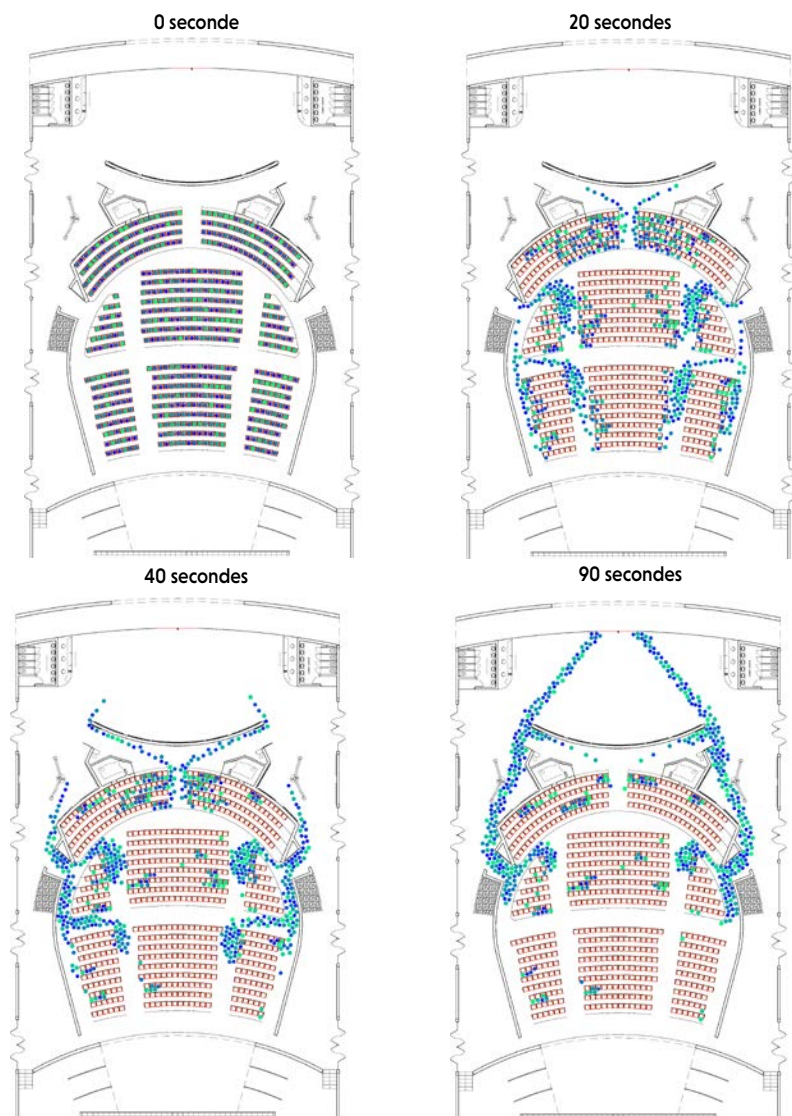
Dans les modèles d'automate cellulaire, chaque individu de la foule est représenté par un pion qui se déplace sur un quadrillage selon certaines règles. Dans le cas d'une évacuation vers une sortie, par exemple, un pion a une plus grande probabilité d'aller sur une case qui le rapproche de la sortie, mais il lui est impossible d'accéder à une case occupée. Ci-contre, deux instants d'une simulation d'évacuation (*en haut*), ainsi que les trajectoires de chacun des pions-individus (*en bas*).

jusqu'à la ligne de départ. Ce dernier ayant lieu en plusieurs fois, chaque cohorte de participants se retrouve à effectuer une séquence de marche et d'arrêt. En effectuant une analyse détaillée de la façon dont la densité de coureurs évolue, les deux physiciens ont validé avec une grande précision un modèle hydrodynamique de foule polarisée (c'est-à-dire où tous les individus vont dans la même direction) qui prédit notamment la propagation des ondes d'arrêt et de remise en marche observée vers l'arrière de chaque cohorte (*voir la figure page 34*).

Cependant, en général, l'analogie avec les fluides a des limites quand il s'agit de modéliser une foule non polarisée, car elle ne prend en compte que la foule dans son ensemble, et non les individus. En 1995, déjà conscient de cette difficulté, Dirk Helbing réfléchissait à une autre analogie intégrant les comportements individuels. Il a ainsi cherché à construire pour les piétons un formalisme microscopique, proche de celui de Newton : les personnes seraient des particules de masse non nulle, comme des billes, soumises à l'action de deux types de forces. Un premier type encodait la tendance de l'individu à adopter sa vitesse souhaitée, et l'autre type correspondrait à l'ensemble des forces exercées par les autres individus, nommées «forces sociales». Dans une situation d'évacuation, la foule se comporterait ainsi comme un ensemble de billes sur un plateau horizontal, qui subiraient à la fois une forte attraction vers un même trou (la sortie) et des forces de répulsion entre billes voisines, reproduisant la tendance des individus à se maintenir à une certaine distance de leurs semblables. Cette approche est toujours utilisée dans nombre de logiciels commerciaux destinés à modéliser les flux de foules dans des stades, gares ou aéroports.

LA PISTE DE L'AUTOMATE CELLULAIRE

Un autre modèle également très utilisé est celui de l'automate cellulaire, proposé en 2001 par Carsten Burstedde et ses collègues à l'université de Cologne, en Allemagne. Il consiste à représenter la zone d'intérêt sous la forme d'un quadrillage régulier, dont les carrés ont des côtés de l'ordre de 40 centimètres, de sorte que chaque cellule ne puisse accueillir qu'une seule personne. Des «pions» disposés sur ce quadrillage (un pion au maximum par case) modélisent les personnes. Dans la forme la plus rudimentaire du modèle, chaque pion tire au hasard, à chaque étape, une position parmi les cases voisines. La tendance de l'individu est prise en compte en affectant une plus grande probabilité aux cases les plus proches de la sortie, et l'interaction avec les autres est simplement encodée par l'impossibilité



MODÈLE GRANULAIRE

Ce modèle fonctionne bien pour modéliser l'évacuation d'un théâtre (ci-dessus plusieurs étapes d'une telle simulation).

On considère que l'ensemble des paramètres qui décrivent les positions de chaque spectateur forme une sorte de goutte qui à chaque instant cherche à dévaler le plus efficacement possible une pente dans un paysage multidimensionnel, donnée par la somme des distances de chacun à la sortie et les diverses contraintes du lieu.

d'accéder à une case déjà occupée (voir la figure page ci-contre). Un avantage de ce modèle est sa simplicité conceptuelle et de mise en œuvre. Cependant, le quadrillage limite son réalisme, de même que le traitement des interactions entre piétons, assez succinct.

Il y a une dizaine d'années, avec Juliette Venel, alors doctorante au laboratoire, nous avons par ailleurs proposé une nouvelle approche, que nous continuons de développer. Cette approche est fondée sur un principe très général – le « flot de gradient » –, qui décrit, par exemple, le mouvement d'une goutte d'eau qui dévalerait une colline en suivant à chaque instant la ligne de plus grande pente. Mathématiquement, on suit la position de la goutte sur une carte au cours du temps (il s'agit donc d'un point dans le plan), et l'on représente l'altitude sur ce plan par une fonction de cette position (tout comme, sur Terre, l'altitude est une fonction de la longitude et de la latitude). À chaque instant, la goutte tend à diminuer au maximum son altitude, et donc à trouver, dans son environnement, la

position où la pente de la fonction altitude est la plus grande (cette pente n'est autre que le gradient de la fonction, c'est-à-dire en l'occurrence la dérivée de la fonction par rapport à la position, d'où le nom du principe).

UNE « GOUTTE » DE FOULE

Pour une foule, la « goutte » est l'ensemble des paramètres décrivant les positions des personnes impliquées, et la modélisation repose alors entièrement sur la définition d'une quantité qui jouerait le rôle de l'altitude et que la foule tendrait à réduire. Dans le cas d'une évacuation, il est très naturel de définir cette quantité comme une insatisfaction globale, plus précisément comme la somme des distances des personnes à la sortie, à laquelle on ajoute des termes qui prennent en compte les interactions. Un terme, notamment, atteint de très grandes valeurs lorsque deux personnes commencent à se chevaucher, ce que les lois de la physique classique (et la décence) interdisent. Une fois que la quantité à minimiser est bien définie, il est assez facile de laisser la foule, identifiée maintenant à un point unique dans un espace de grande dimension, glisser le long de ce paysage virtuel. Du fait de l'interdiction stricte des chevauchements, ce modèle décrit la foule comme une collection de grains rigides, et l'on parle ainsi de modèle granulaire.

Malgré leur caractère assez rudimentaire en termes de prise en compte du comportement humain, ces différents modèles offrent une description assez correcte du mouvement de foules dans de multiples situations, en particulier lorsque les tendances individuelles sont bien maîtrisées : files d'attente, croisement de flux, évacuation à travers une sortie étroite... Cette dernière situation – un cas d'étude classique – est souvent utilisée pour évaluer le comportement d'un modèle dans des cas de forte densité. À l'aide d'expériences très documentées, on compare les résultats du calcul avec les données expérimentales. Pour chacun des modèles microscopiques décrits ci-dessus, diverses équipes ont ainsi retrouvé les caractéristiques expérimentales avec une bonne précision, jusqu'aux propriétés statistiques fines vérifiées par la distribution des temps entre deux sorties successives d'individus.

Dans ce contexte particulier de l'évacuation à travers une sortie étroite, certains phénomènes excitent actuellement la curiosité des scientifiques. Parmi eux, l'effet *faster is slower*, que plusieurs équipes ont étudié à partir des années 2000, joue un rôle central. Dans des situations d'évacuation d'urgence, on observe qu'une trop grande précipitation des individus conduit parfois à un ralentissement de la foule dans son ensemble, voire au blocage de la sortie de secours. Une forme spectaculaire et d'une ➤

➤ certaine manière inversée de ce phénomène est l'accélération que l'on observe dans certaines situations à la suite de l'ajout d'un obstacle en amont de la sortie (*voir la figure page ci-contre*). La parenté entre les deux phénomènes est claire : l'obstacle tend à ralentir certaines personnes et conduit pourtant à une accélération de l'évacuation (*effet slower is faster*). Diverses équipes ont exploré expérimentalement ce phénomène dans les années 2000, tant avec des piétons qu'avec des animaux, notamment des moutons.

Ce type d'effet paradoxal apparaît dans de multiples domaines et n'est pas restreint aux mouvements collectifs. Ainsi, la loi dite de Yerkes-Dodson décrit une amélioration des performances d'un individu lorsque son niveau de stress augmente, jusqu'à un certain seuil au-delà duquel le stress devient contre-productif. La physique des objets ou substances non vivantes regorge aussi d'exemples de tels phénomènes. Des physiciens ont ainsi établi qu'une goutte de fluide visqueux qui dévale une pente à la surface rugueuse est susceptible d'être ralentie par une augmentation de la gravité : la gravité déforme et écrase la goutte, agrandissant ainsi la taille de la zone de friction.

MODÉLISER LA FRICTION ENTRE INDIVIDUS

Cet exemple simple n'est peut-être pas si éloigné de la foule, une fois de plus assimilée à une goutte dévalant une pente. De fait, la plupart des modèles décrits précédemment reproduisent cet effet sous réserve d'introduire une part de friction dans les interactions. Comment procède-t-on concrètement ? Prenons le modèle de l'automate cellulaire. L'idée consiste simplement à tirer au sort, pour chacun des individus identifiés à un pion sur le quadrillage, la case sur laquelle il souhaite atterrir, sans tenir compte des mouvements des autres. Cette première étape conduit parfois à des conflits où deux personnes se disputent la même case. Pour modéliser la friction entre individus, on décide qu'en cas de conflit, il existe une probabilité non nulle (ce nombre entre 0 et 1 est un paramètre essentiel du modèle) que personne ne l'emporte, c'est-à-dire que les deux (voire trois) compétiteurs soient renvoyés à leur position initiale. On comprend bien alors qu'augmenter la propension des individus à avancer coûte que coûte accroîtra le nombre de conflits, et ralentira donc la foule. De fait, cette approche de l'automate cellulaire reproduit l'effet *faster is slower* de façon satisfaisante.

Un débat subsiste pourtant sur les causes principales de ce phénomène. En effet, le modèle granulaire du flot de gradient n'inclut aucun ingrédient de type friction. Or il

SOURIEZ, VOUS ÊTES SUIVI

Les moyens de suivre les foules dans leur mouvement ont considérablement évolué ces dernières décennies. Si le comptage manuel est encore pratiqué dans certaines circonstances, on utilise de plus en plus des capteurs de flux. Ces capteurs fonctionnent selon un principe simple : une caméra à la verticale de la zone couverte enregistre un flux vidéo, qui est analysé en temps réel pour compter les personnes qui passent dans un sens ou dans l'autre au travers d'une ligne virtuelle prescrite par l'utilisateur. De nouveaux modèles 3D, équipés de deux caméras, construisent même une carte de hauteur (exactement comme nos yeux nous

permettent d'évaluer la distance à l'objet regardé), laquelle assure finesse et robustesse au comptage en permettant de distinguer les enfants de leurs parents, ainsi que les bagages et objets divers.

En mécanique des fluides, une telle approche est dite eulérienne : elle donne des informations au cours du temps en un point fixe de l'espace, qui correspondent à des individus différents. Mais grâce aux nouvelles technologies, on accède aussi à présent à des informations de nature lagrangienne, c'est-à-dire afférentes à une personne donnée qui se déplace. Le smartphone que chacun emporte avec lui est localisé en permanence grâce aux fonctionnalités GPS, complétées par les accès automatiques aux bornes Wifi présentes dans l'entourage. Cette localisation est certes défaillante lorsque la personne se trouve au sein d'un bâtiment, mais en installant de petites balises Bluetooth (*beacon*) dans celui-ci, on recouvre la capacité de localisation à quelques mètres près. Si l'acquisition de la position est régulière (toutes les 10 ou 20 secondes), il est possible de reconstruire la trajectoire d'une personne et donc de savoir où elle s'est attardée, voire d'en déduire ses centres d'intérêt et certains aspects de son mode de vie.

Ce type de fonctionnalité est extrêmement contrôlé, en France en particulier : un tel suivi ne peut se faire que sous la condition de l'anonymat le plus strict. Le caractère lagrangien du suivi reste en revanche assuré, au moins pendant quelques jours, par la connaissance d'un identifiant associé au smartphone, et donc à la personne qui le possède, mais sans que son nom puisse être connu ni *a fortiori* stocké avec les autres informations. B. M. et S. F.

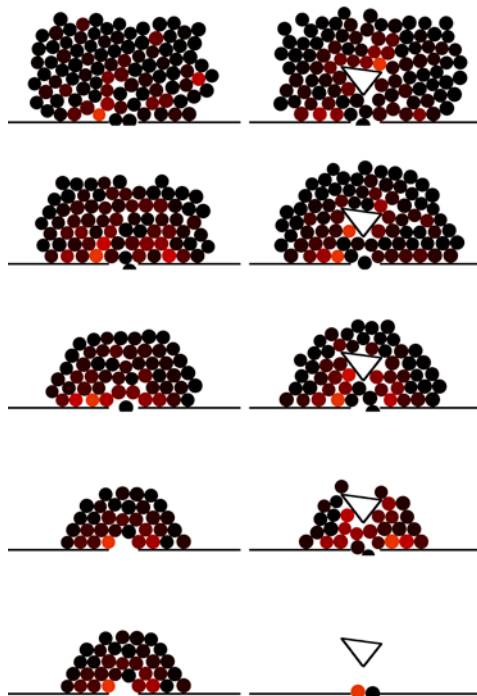


reproduit cet effet et en fournit une explication plausible si l'on se concentre sur le rôle fluidifiant d'un obstacle. Reprenons l'image d'une goutte dévalant une pente, qui se retrouve coincée dans un petit trou présent sur son parcours. Si, sur ce parcours, l'on rajoute un obstacle bien profilé en amont du trou et si la goutte recommence alors sa course, l'obstacle la force cette fois à contourner le trou et lui permet ainsi de poursuivre son chemin vers la vallée. La goutte coincée au fond de son trou correspond à un bouchon de la foule en amont de la sortie, et l'obstacle évite les pièges de ce type.

On se retrouve donc avec deux modèles – l'automate cellulaire et le modèle

« FASTER IS SLOWER » ET INVERSEMENT

Quand une foule se presse vers une sortie, les contraintes sont telles à l'abord de l'ouverture que l'évacuation ralentit, ou même se bloque (voir la séquence à gauche, effectuée en utilisant le modèle granulaire, où plus une bille est rouge, plus elle subit de pression de ses voisines) – un effet connu sous le nom de *faster is slower*. En revanche, lorsque l'on place un obstacle devant la sortie, l'écoulement est bien plus efficace (à droite).



granulaire – qui reproduisent chacun ce phénomène paradoxal tout en étant fondés sur des ingrédients très différents. Cet exemple illustre une difficulté essentielle de la démarche de modélisation en général: il ne suffit pas de reproduire un effet pour être certain d'en avoir identifié les causes...

Ces dernières années, la science encore jeune de la modélisation des mouvements de foule a connu des succès spectaculaires et s'étend peu à peu à toutes sortes de domaines. Le modèle de forces sociales est intégré à des logiciels commerciaux utilisés par exemple pour modéliser les flux de touristes sous la tour Eiffel ou le mouvement des passagers dans les grands centres de transit. Il est aussi de plus en plus fréquent que la conception d'un projet architectural s'accompagne de la simulation des flux piétonniers à travers des espaces non encore construits. L'utilisation de ces modèles pour obtenir un rendu plus réaliste des mouvements de personnages de films ou de jeux vidéo s'est par ailleurs généralisée: les scènes de bataille du *Seigneur des Anneaux* et de *Game of Thrones*, par exemple, impliquant un nombre considérable d'entités dotées de capacités cognitives proches des nôtres, ont été réalisées à l'aide de modèles particuliers de foules.

Remarquons que, dans tous les exemples cités, les tendances spontanées des individus étaient assez simples à décrire, soit prévisibles dans le cas de l'évacuation d'un bâtiment ou du transit de passagers dans une gare, soit issues d'un scénario préétabli pour les films d'animation. Dans des situations plus générales, qui mélangent des individus aux tendances multiples et aux modalités d'interaction complexes,

les modèles actuels présentent des limites et les défis à relever sont nombreux.

En premier lieu, l'intégration à ces modèles de facteurs psychologiques dynamiques reste balbutiante. Un pétard qui explose au sein d'une foule dense peut entraîner un mouvement de panique qu'il est très difficile d'appréhender à l'heure actuelle. La notion même de panique à l'échelle d'un individu n'est pas clairement définie, son apparition et son évolution variant très fortement d'un individu à l'autre et les modalités de sa propagation au sein d'une foule dense étant mal connues. À partir des modèles, il est certes possible de reproduire *a posteriori* un mouvement de panique qui a été filmé, mais élaborer un modèle général de mouvement qui prédirait ce qui se passerait pour un large spectre de situations de ce type est actuellement hors de portée.

DU PIÉTON À LA THÉORIE DES JEUX

En second lieu, l'interaction des individus avec un milieu potentiellement hostile nécessite de coupler ces modèles avec d'autres variables, par exemple un niveau de visibilité conditionné par la présence de fumée en cas d'incendie. Enfin, la capacité de chacun à développer des stratégies fines d'évitement et d'optimisation des trajectoires, sans même en avoir conscience, est délicate à mettre en équations. Chaque individu élabore, pour les secondes à venir, un projet de trajectoire fondé sur son intuition de ce que les autres piétons feront. Le comportement effectif résulte donc d'un processus de négociation plus ou moins conscient, dont certains aspects relèvent de la théorie des jeux: le gain consécutif à un choix de stratégie dépend des choix des autres. Il est à prévoir que les travaux déjà entamés vers l'élaboration de modèles intégrant ces aspects se multiplieront ces prochaines années et permettront d'affiner le caractère prédictif des modélisations.

Par ailleurs, l'accroissement récent et considérable de la masse de données que l'on acquiert sur les mouvements de personnes (voir l'encadré page ci-contre) ouvre la voie à d'autres approches de modélisation, non plus fondées sur la formalisation de phénomènes bien identifiés, mais pilotées par les données. Malgré le caractère un peu frustrant pour le scientifique de s'éloigner d'une logique phénoménologique et causale, ces approches naissantes, fondées sur des techniques d'apprentissage profond, ont un potentiel prédictif considérable et devraient bouleverser prochainement ce domaine déjà en pleine ébullition. Dans les années à venir, il n'est pas exclu que se généralise comme nous en avons pris l'habitude pour le trafic routier, une « météo des foules » qui nous donnerait des indications sur le niveau de congestion attendu zone par zone, à l'échelle d'une ville. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Moussaïd, **Foulescopie : Ce que la foule dit de nous**, HumenSciences, 2019.

N. Bain et D. Bartolo, **Dynamic response and hydrodynamics of polarized crowds**, *Science*, vol. 363, pp. 46-49, 2019.

B. Maury et S. Faure, **Crowds in Equations**, World Scientific Publishing Europe Ltd., 2018.

D. Helbing et P. Molnár, **Social force model for pedestrian dynamics**, *Phys. Rev E*, vol. 51, pp. 4282-4286, 1995.

Un petit pas qui a 50 ans

L'anniversaire de la mission *Apollo 11* est l'occasion de revenir sur cet exploit que l'on pensait quasi impossible à l'époque. Avec l'émergence de nouveaux projets, nous pourrions revivre une aventure similaire dans les années à venir.

