

> 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.

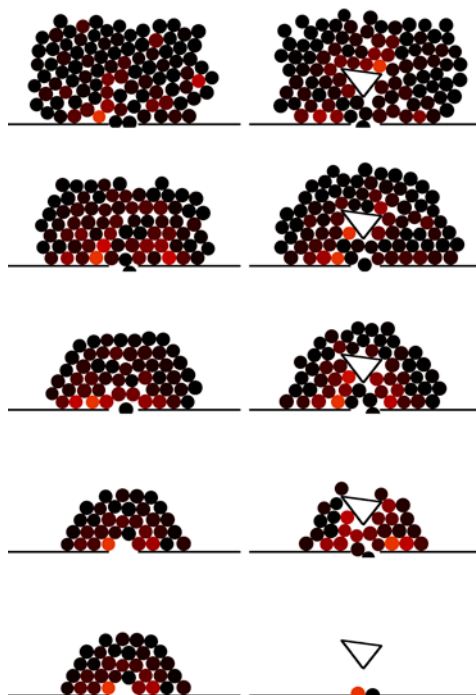


reproduit cet effet et en fournit une explication plausible si l'on se concentre sur le rôle fluidifiant d'un obstacle. Reprenons l'image d'une goutte dévalant une pente, qui se retrouve coincée dans un petit trou présent sur son parcours. Si, sur ce parcours, l'on rajoute un obstacle bien profilé en 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 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, **Fouloscopie : 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.