

> 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