



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 encoderait 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