

Comment les piétons marchent dans la foule

La plupart des modèles utilisés jusqu'à présent pour simuler le déplacement collectif des piétons s'inspirent de la physique. Mais l'observation a permis d'établir un modèle plus simple fondé sur deux règles de comportement.

Quel calvaire de se retrouver englué au milieu d'une foule dans une rue commerçante au moment des soldes ! La personne devant vous traîne des pieds, votre voisin vous bouscule, vos nerfs lâchent, mais rien n'y fait : impossible d'aller plus vite. Essayez de doubler et vous vous retrouverez dans une situation encore plus critique, nez à nez avec un flux massif de piétons se déplaçant en sens opposé. Une seule solution : se résigner et suivre le flot, comme tout le monde. Votre patience devrait être récompensée. Car, à l'instar des insectes sociaux comme les fourmis, les piétons s'auto-organisent : tous ceux qui se déplacent dans le même sens se rangent du même côté de la rue, laissant l'autre moitié au flux venant en sens inverse.

Reproduire le réel. Mais dans d'autres situations, le même processus produit des comportements collectifs totalement inadaptés, dont les conséquences se révèlent parfois dramatiques. Ainsi en janvier 2006, une violente bousculade devant les stèles symbolisant Satan à Mina, à l'est de La Mecque, a fait 362

morts, au dernier jour du pèlerinage annuel (lire : « Les bousculades collectives sont incontrôlables », p. 59). Et à la Love Parade de Duisbourg, en Allemagne, en juillet 2010, vingt et une personnes périrent dans des conditions similaires.

La compréhension puis la modélisation de ces phénomènes ouvrent l'espoir de pouvoir les réguler. Mais les modèles utilisés jusqu'à présent, tous inspirés de la physique, ne parviennent qu'imparfaitement à reproduire le réel. C'est ce qui a conduit notre équipe à l'université Paul-Sabatier de Toulouse à élaborer une nouvelle approche fondée sur l'observation du comportement individuel du piéton.

Les premières tentatives de modélisation sont apparues dans les années 1970, lorsque l'ingénieur australien Leroy Henderson assimila le mouvement d'une foule à celui d'une rivière et proposa de le formaliser à l'aide de la mécanique des fluides. Plus tard en 1995,



PAR Mehdi Moussaïd, post-doctorant au centre de recherches sur la cognition animale de l'université Paul-Sabatier, à Toulouse. moussaïd@cict.fr

AVEC Guy Theraulaz, directeur de recherche au CNRS, qui travaille dans ce même laboratoire. theraula@cict.fr

L'essentiel

> **LES LOGICIELS** de simulation de foule inspirés de la physique manquent de réalisme.

> **DES OBSERVATIONS** sur le terrain ont révélé deux règles de comportement des piétons.

> **CETTE APPROCHE** a permis d'établir un modèle plus simple qui permet de reproduire avec réalisme le comportement de foules en déplacement.



Lors de la Love Parade de Duisbourg, en Allemagne, le 24 juillet 2010, la foule a envahi les rues. Il s'en est suivi de violentes bousculades qui coûtèrent la vie à vingt et une personnes. © DANIEL ROLAND/ AFP

dans la continuité de ce type d'approche, le physicien Dirk Helbing, de l'École polytechnique fédérale de Zurich, proposa le modèle des « forces physiques sociales » [1]. Par analogie avec la physique newtonienne, Helbing suggère que le comportement d'un piéton peut être formalisé à l'aide d'un système de forces : certaines l'attirent vers sa destination, et d'autres le repoussent des autres individus et des obstacles afin d'éviter les collisions. Telle une particule dans un gaz, le piéton est considéré comme un agent passif dont les mouvements sont déterminés uniquement par des forces d'attraction et de répulsion.

Cette analogie peut paraître simpliste. Pourtant, elle a permis à Dirk Helbing de créer un modèle qui parvient, à partir d'une combinaison de forces physiques appliquées à chaque individu, à reproduire une organisation collective : la formation spontanée de files de piétons dans une rue. Ce modèle est devenu un outil incontournable utilisé par la plupart des logiciels de simulation de foules pour aménager les espaces urbains et les lieux publics comme les gares ou les stades. Et il a donné naissance à une

multitude de variantes, incluant des équations de mouvement de plus en plus complexes.

Cependant, cette approche est incomplète. Les comportements individuels ainsi modélisés manquent de réalisme. Dans ces simulateurs, les piétons ont tendance à « rebondir » les uns contre les autres comme des particules, sans anticiper les collisions. Le nombre de files qu'ils forment augmente avec la largeur de la rue, alors que dans la réalité ce nombre se limite à deux. Quant aux valeurs attribuées aux forces, elles sont fixées approximativement sans avoir été mesurées expérimentalement, ce qui soulève des questions relatives à la validité du modèle.

Approche expérimentale. C'est dans ce contexte que notre équipe a entamé en 2006 une collaboration avec Dirk Helbing. Notre objectif était alors de valider l'approche des physiciens en améliorant leur modèle à l'aide de nos observations. Il nous fallait pour cela collecter un large éventail de données à partir d'expériences en laboratoire et d'enregistrements vidéo en milieu urbain : en mesurant

les distances d'évitement des piétons, leurs changements de trajectoire ou de vitesse, nous pensions pouvoir déterminer très précisément l'intensité des « forces physiques sociales » qui régissent leur comportement.

Tout d'abord, nous avons réalisé une série d'expériences très simples : nous avons observé ce qui se passe dans un couloir quand deux piétons se croisent. Les résultats ont montré un phénomène que le modèle physique avait ignoré : les piétons ne choisissent pas un côté au hasard lorsqu'ils se croisent, mais ils obéissent à des conventions sociales [2]. Sur un total de 150 observations, 80 % des participants se sont croisés par la droite.

De plus, des observations réalisées en milieu urbain couplées à de nouvelles expériences impliquant un grand nombre de piétons montrent que cette tendance s'amplifie au fur et à mesure que la foule devient plus dense [fig. 1]. Plus les gens s'évitent par la droite, plus il devient difficile de marcher à gauche, ce qui conduit le trafic à se structurer spontanément à droite en deux files. Or cette préférence pour la droite est culturelle : dans d'autres pays, asiatiques >>>

Comment les piétons marchent dans la foule

►►► notamment, les piétons préfèrent la gauche. Et nous avons constaté que ces conventions sociales qui régissent le comportement des piétons ne s'intègrent pas facilement dans le modèle de Dirk Helbing.

Déplacement en groupe. En analysant les enregistrements vidéo que nous avons réalisés dans les rues piétonnes en France, nous avons également observé une très forte tendance des piétons à marcher en groupe [3]. En milieu urbain, 50 % à 70 % d'entre eux se déplacent en petits groupes, généralement constitués de deux à quatre personnes. Des analyses plus approfondies montrent que la configuration de marche préférée d'un groupe de trois piétons ou plus est une forme en V : les personnes se trouvant au milieu du groupe reculent légèrement, et celles qui occupent une position latérale se rapprochent. Dans les modèles inspi-

rés de la physique, les lois appliquées pour le déplacement en groupe relèvent de l'aérodynamique et prédisent la configuration opposée, en V inversé. Mais chez les piétons, le besoin d'interactions sociales contrecarre ces lois : la configuration en V est la seule qui permet à chaque membre du groupe de communiquer avec les autres tout en progressant vers l'avant. Celle-ci ralentit le groupe dans sa progression. Ainsi, l'omniprésence de ces groupes combinée à leur forme particulière réduit d'environ 17 % la vitesse moyenne du flux piétonnier par rapport à une vitesse moyenne estimée à 4,6 kilomètres par heure. De telles interactions sociales jouent donc un rôle essentiel dans la dynamique du trafic piétonnier, mais elles sont, elles aussi, difficilement modélisables à l'aide de concepts physiques.

Finalement, nos observations ne nous ont pas permis de valider le modèle de

forces physiques sociales. En 2008, nous avons donc décidé de partir sur de nouvelles bases. Nous nous sommes inspiré des méthodes que nous utilisons pour étudier les sociétés animales : essayer de découvrir par l'observation des lois de comportement individuel qui permettent de modéliser un comportement collectif.

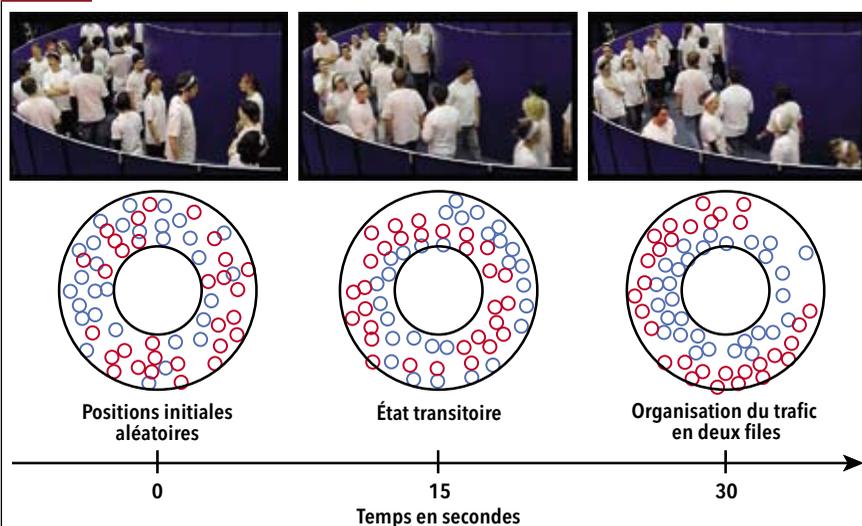
Règles de comportement. Pour cela, nous avons adopté le point de vue subjectif d'un piéton lorsqu'il évolue dans une foule. La représentation en trois dimensions du champ visuel d'un piéton fait apparaître une succession de zones encombrées, entrecoupées d'espaces libres plus ou moins larges. Cela nous a permis d'observer une première règle comportementale : un piéton choisit de se déplacer en direction de l'espace libre suffisamment large pour qu'il s'y engage et qui le rapproche le plus de sa destination. La différence avec le modèle physique est fondamentale : notre piéton n'est plus considéré comme une particule passive soumise à un champ de répulsion mais comme un agent doué de capacités cognitives qui choisit une direction sur la base des informations visuelles qu'il possède.

Puis nous avons observé une seconde règle comportementale : le piéton ajuste en permanence sa vitesse de manière à conserver une distance minimale de sécurité par rapport aux autres piétons. Si cette distance est courte, il ralentit. Si elle est plus importante, il accélère jusqu'à atteindre sa vitesse de confort.

La première règle permet de calculer la direction que prend le piéton à un instant donné, et la seconde sa vitesse au même moment. Ces deux règles nous ont permis de construire un nouveau modèle. À partir des distances qui séparent le piéton des obstacles et des autres piétons, notre modèle calcule la direction qu'il prend, en appliquant la première règle et sa vitesse de déplacement, en appliquant la seconde. En répétant ce calcul, il prédit la trajectoire du piéton.

Nous avons ensuite constaté en faisant des simulations numériques que

Fig.1 Les piétons s'auto-organisent



CETTE EXPÉRIENCE a été menée dans un couloir circulaire de l'université de Rennes-I avec une soixantaine de sujets. Elle montre que des piétons, auxquels on demande de se déplacer dans le sens des aiguilles d'une montre (en bleu) ou dans le sens inverse (en rouge), se rangent spontanément en deux flux opposés au bout de 30 secondes, les uns au centre (en bleu) et les autres à la périphérie (en rouge).

ce modèle à deux règles comportementales permettait de reproduire avec réalisme une large palette de comportements collectifs. Par exemple, l'organisation spontanée du trafic en deux couloirs de déplacement. Mais aussi, et simplement là où le modèle

physique a besoin d'hypothèses supplémentaires, l'effet d'accordéon : au-delà d'une densité critique – évaluée à 2,5 piétons par mètre carré par notre modèle, le déplacement des piétons perd sa fluidité pour laisser place à des vagues successives de mouvements

vers l'avant, entrecoupées de brèves périodes durant lesquelles les piétons s'arrêtent. Or on sait que cet effet d'accordéon est un signal d'alerte important : il peut annoncer un épisode beaucoup plus dramatique de bousculades collectives comme celui de La Mecque en 2006. À l'avenir, notre modèle plus simple et plus réaliste que ceux inspirés de la physique pourrait donc servir aux urbanistes pour assurer la sécurité des personnes lors de grands rassemblements. ■

Les bousculades collectives sont incontrôlables

En décembre 2006, l'équipe de Dirk Helbing s'est rendue au pèlerinage de La Mecque pour étudier les mouvements de foule. Les physiciens ont observé un phénomène collectif jamais identifié auparavant, qu'ils ont appelé turbulence : lorsque la densité est comprise entre 6 et 9 piétons par mètre carré, de gigantesques mouvements de masse se forment. L'analyse des enregistrements vidéo montre que les individus compressés les uns contre les autres commen-

cent à se bousculer pour élargir leur espace vital. Mais à un tel niveau de densité, les pressions physiques exercées localement se propagent rapidement de proche en proche pour s'étendre à l'ensemble de la foule. Et des groupes entiers de piétons peuvent alors être déplacés dans une direction aléatoire, perdant même parfois le contact avec le sol. De tels mouvements, dont l'amplitude peut atteindre une dizaine de mètres, sont totalement incontrôlables.

[1] D. Helbing et al., *Physical Review E*, 51, 4282, 1995.

[2] M. Moussaïd et al., *Proceedings of the Royal Society B*, 276, 2755, 2009.

[3] M. Moussaïd et al., *PLoS One*, 5, e10047, 2010.

Pour en savoir plus

> James Surowiecki, *La Sagesse des foules*, JC Lattès, 2008.

> Philip Ball, *Critical Mass : how one Thing Leads to Another*, Farrar, Straus and Giroux, 2005.

> Scott Camazine (dir.), *Self-Organization in Biological Systems*, Princeton University Press, 2001.

6^e
Assises

& Recherche Entreprises

28 mars 2011
Centre des Congrès
Reims

Speed-meeting :
"Les Rencontres
Tremplin Emploi"

Actualité de la recherche et de
l'innovation en Champagne-Ardenne

Renseignements au 03 26 85 84 89 ou assises@cr-champagne-ardenne.fr

RÉGION
CHAMPAGNE  ARDENNE

<http://assises.re.champagne-ardenne.eu>