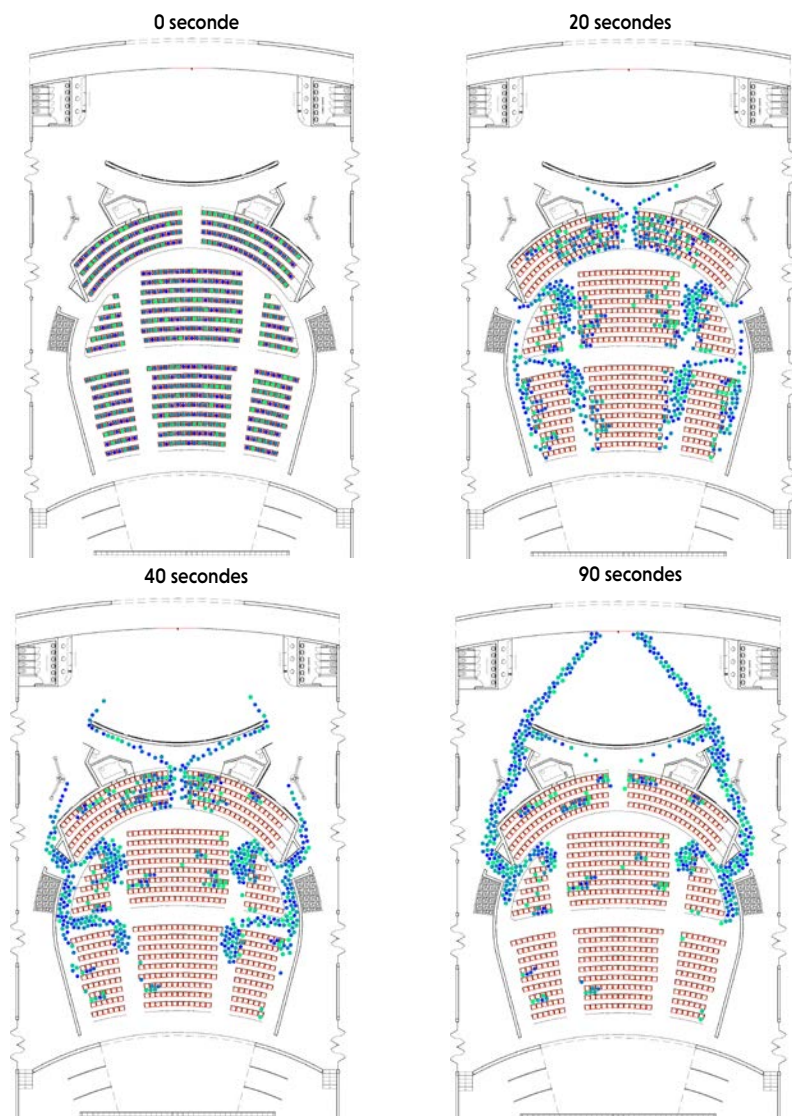




MODÈLE GRANULAIRE

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