
TIPE

**Comment les modélisations peuvent-elles nous permettre de réduire les risques de
mouvement de foule ou de foule compacte?**

Leila Iksil

2022-2023

1 État de l'art

Il existe différentes méthodes pour modéliser une foule. Tout d'abord, les modèles macroscopiques considèrent la foule comme un tout et non pas comme un ensemble d'individus. Les modèles statistiques s'inspirent de la dynamique des fluides ou des gaz, ils dépendent de l'observation du réel et ne sont donc applicables qu'à une situation observée, mais la méthode de calcul des trajectoires est efficace. Enfin, les modèles de flots modélisent l'espace comme un champ de potentiels, de forces qui agissent sur les individus et leur vitesse. Ce type de modèle est déterministe, les informations contenues dans le champ de potentiel sont stationnaires, cette méthode est efficace si les individus ont un objectif commun.[2]

Les modèles microscopiques quant à eux considèrent la foule non pas comme un tout, mais comme un ensemble d'individus. Parmi ce type de modèles, il y a les modèles basés force. Différentes forces influent sur les individus (influence des piétons à proximité, ...), cette méthode de calcul est efficace mais manque souvent de réalisme. Les modèles géométriques prédisent pour chaque individu leur future position, puis leur trajectoire est ajustée pour éviter les chocs, pour cela, leur trajectoire est approximée par une droite ou une courbe. Les modèles basés données sont mis en place en récoltant des données, à partir d'analyse de vidéos par exemple, puis ces données sont fournies à une IA. Ce type de modèle dépend également de l'analyse du réel. La modélisation selon un automate cellulaire consiste à discréteriser l'espace en cases dans lesquelles le piéton peut se déplacer. On affecte par la suite à chaque case une certaine probabilité (en fonction des facteurs pris en compte). Cette méthode est efficace, cependant, à l'échelle microscopique, la discréterisation de l'espace amène à un manque de précision. Enfin, il y a les modèles à bases de règles, le mouvement d'une foule est simulée en faisant évoluer les piétons selon certaines règles (chaque piéton essaie d'atteindre sa vitesse optimale,...).[2,4]

À partir de ces modélisations et d'expériences, plusieurs conclusions ont été tirées sur les façons de limiter les risques en présence d'une foule importante. Tout d'abord, placer un obstacle devant une sortie ou devant un espace où le piéton entrerait dans un endroit plus restreint fluidifie la foule [6] et permet un passage plus rapide d'un endroit à l'autre. Cette méthode permet donc de limiter la congestion de la foule. Ces obstacles sont généralement des piliers, mais un large panneau semblerait plus efficace. De plus, plus la foule est stressée, plus elle essaie de sortir rapidement, moins l'évacuation est rapide. Un des effets qui cause cela est l'effet « stop and go ». A cause de l'importante congestion, les piétons stoppent régulièrement puis reprennent leur trajectoire, cet effet ralentit la foule et peut également être observé dans le cas des embouteillages, et a la même conséquence.

Lors d'une évacuation, plusieurs facteurs psychologiques et sociaux influencent les choix des individus. Parmi les facteurs sociaux, il y a tout d'abord les liens avec les autres personnes présentent (famille, amis, ...), mais également la tendance des individus à rester en groupe et parfois à suivre un leader (considéré dans certaines modélisations) [3]. La propension au stress et la vigilance influent également sur l'évacuation. Lors d'une alerte, un des effets les plus observés est cependant le temps de réaction de chaque individu, il y a un temps de latence entre la réception de l'information et l'action. Un autre est la familiarité avec les lieux, une personne familière avec l'endroit où se produit l'évacuation aura tendance à prendre son chemin habituel pour évacuer.[1]

2 Introduction

2.1 Présentation

Les mouvements de foules peuvent être extrêmement dangereux, comme le montre la bousculade du Hajj en 2015, qui a fait près de 2300 morts. Je me suis intéressée dans ce TIPE à l'utilité de modélisations informatiques afin de déterminer comment réduire les risques de blessures, de mort en utilisant notamment des obstacles.

2.2 Hypothèses

Je modélise les êtres humains comme des cercles indéformables et considère que chaque être humain connaît approximativement le chemin menant à la sortie la plus proche.

2.3 Critères d'influence

Dans les deux simulations, je prends en compte la propension au stress de l'être humain à avancer (si iel a tendance à être très stressé ou non), la congestion autour de cette personne dans un certain rayon, la distance à la sortie (sortie définitive), à un obstacle et à une autre personne. Dans la première simulation, je ne modélise que des pièces. Je considère comme critère additionel : la connaissance qu'il y a un danger nécessitant l'évacuation. Dans la seconde, je modélise des bâtiments, les humains devront passer à travers plusieurs pièces pour sortir. Je considère comme critère additionel : la distance à une porte (pour sortir d'une pièce et en atteindre une plus proche de la sortie).

3 Première simulation: simulation microscopique naïve

3.1 Représentation des données

Pour représenter les données, je vais créer des types avec plusieurs champs :

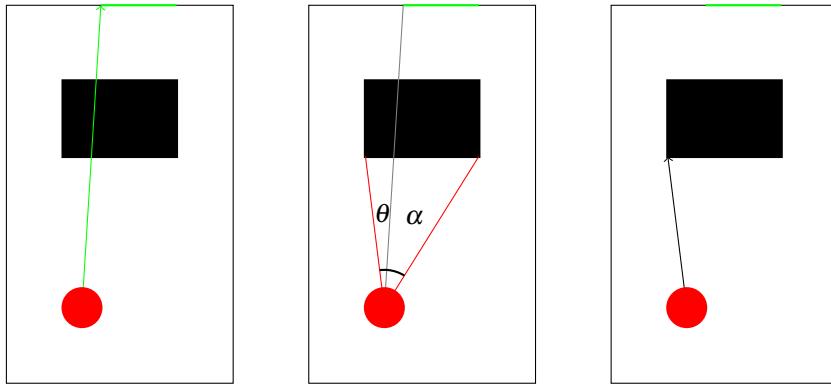
- humain: position, vitesse désirée, propension au stress, congestion, vitesse atteinte, direction choisie, rayon, si la personne est sortie, indice de la sortie visée, connaissance du danger
- sortie: position de la sortie et sa largeur
- obstacles: coordonnées des coins de chaque obstacle (je ne modélise que des obstacles rectangulaires)

Je stocke ces informations dans des tableaux.

3.2 Avancer la population

Pour faire avancer la population, pendant un pas de temps $\delta t \ll 1$, j'effectue plusieurs opérations:

1. Mélanger le tableau contenant les êtres humains afin de ne pas faire avancer toujours la personne en premier.
2. Effectuer les opérations suivantes sur les personnes non évacuées et au courant qu'il faut évacuer:
 - (a) Propager l'information de danger aux personnes dans un certain rayon autour de l'être humain. À l'origine, $t = 0$, ce danger sera créé à un endroit aléatoire de la surface, et les humains dans un certain rayon de propagation de l'information seront mis au courant
 - (b) Calculer le vecteur optimal menant l'humain à la sortie qui lui est assignée
 - (c) Ajouter un facteur d'influence à l'humain considéré: les personnes dans un rayon R_1 appliquent une force répulsive, celles dans un rayon $R_2 > R_1$ appliquent une force attractive
 - (d) Récupérer l'obstacle le plus proche de l'humain avec lequel il y a collision si l'humain avance selon ce vecteur, puis effectuer une rotation d'angle de déviation minimal du vecteur, afin que l'humain évite l'obstacle



- (e) Ajouter à ce vecteur un vecteur multiplié par la congestion et la propension au stress qui représente l'influence des personnes avoisinantes sur l'humain. Les personnes dans un certain rayon appliquent une force répulsive sur l'humain, et celles dans un rayon plus large lui appliquent une force attractive.
- (f) Vérifier si il y aurait une collision si l'humain avançait selon ce vecteur. Si il y a collision, faire effectuer à l'humain des mouvements latéraux selon la direction de la largeur de la porte si cela n'entraîne pas de collision, sinon, faire avancer l'humain selon ce vecteur
- (g) Vérifier si la personne est sortie
3. Augmenter le rayon de propagation de l'information de danger.

3.3 Inconvénients

Bien que cette simulation soit réaliste à l'échelle microscopique, étant donné que $\delta t \ll 1$ et que l'espace est non discréte, il y a plusieurs inconvénients:

- les mouvements effectués sont déterministes, en situations similaires, les êtres humains prendront toujours le même chemin
- problème d'évitement d'obstacles qui ont peu d'incidence sur les congestions et trajectoires
- la complexité de cette modélisation est en $O(\|population\| \times \|sorties\| + \Delta t(evacuation)/\delta t \times (\|population\| \times (\|population\| + \|obstacles\|) + dimx \times dimy))$, avec $dimx$ et $dimy$ les dimensions de la surface, et $\Delta t(evacuation)$ le temps d'évacuation. Ainsi, avec un nombre de sorties et d'obstacles fixe, la complexité est en $\|population\|^2$. Les modélisations de populations de plus de 250 personnes sont très peu efficaces

4 2ème simulation: simulation macroscopique avec un automate cellulaire

Afin de pouvoir modéliser une plus grande population, je me suis intéressée aux automates cellulaires.

4.1 Automates cellulaires

Définition 4.1. Un automate cellulaire est une grille de cellules régulières, chacune contient un état et l'ensemble des états possibles est fini. L'état d'une cellule au temps $t + 1$ dépend de l'état d'un nombre fini de cellule au temps t . À chaque évolution, les mêmes règles sont appliquées à chaque cellule.

$\mathbb{P}(x-1, y+1)$	$\mathbb{P}(x, y+1)$	$\mathbb{P}(x+1, y+1)$
$\mathbb{P}(x-1, y)$	(x, y)	$\mathbb{P}(x+1, y)$
$\mathbb{P}(x-1, y-1)$	$\mathbb{P}(x, y-1)$	$\mathbb{P}(x+1, y-1)$

Ici, j'utilise une adaptation d'un automate cellulaire, l'évolution de l'état d'une cellule ne sera pas déterministe, et l'état au temps $t + 1$ pourra dépendre de l'état des cellules au temps t et $t + 1$ en fonction de l'ordre d'avancement des humains. Je divise l'espace et le représente sous forme de matrice de dimension $dimx \times dimy$. Pour une case d'indice (x, y) occupée par une personne, j'attribue à chacune des cases avoisinantes un certain score, puis en fonction du score, j'attribue à chaque case une certaine probabilité, puis je tire une probabilité qui déterminera le déplacement d'un humain. Chaque humain n'occupera qu'une seule case.

4.2 Représentation des données

Je divise l'espace en plusieurs zones, auxquelles on attribue des identificateurs entiers : si l'identificateur d'une zone est inférieur à celui d'une autre et les deux zones sont liées par une porte, un humain ne pourra passer dans l'autre zone que si son identificateur est inférieur à celui de sa zone actuelle. Je représente les données ainsi:

- la matrice représentant la surface sera une matrice de 5-uplets, le premier élément de chaque 5-uplets servira d'identificateur afin de déterminer le contenu d'une case, le reste des éléments contiendra :
 - vide : (0,0,0,0,0)
 - humain : (1, vitesse, sortie, stress, zone)
 - obstacle : (2, xmin, xmax, ymin, ymax) si $ymax \geq 0$
sinon poteau : (2, centrex, centrey, rayon, -3)
 - sortie : (3, xmin, xmax, ymin, ymax)
 - porte : (4, xmin, xmax, ymin, ymax)
- sorties : Je stocke les indices et les zones auxquelles mène chaque sortie dans un tableau et stocke leurs caractéristiques dans un autre tableau
- humains : Je stocke dans un tableau la position de chaque humain et le contenu de la case avant qu'il s'y place (afin de ne pas perdre d'information lorsqu'un humain passe sur une porte)
- obstacles : Je stocke dans un tableau la position d'un coin de chaque obstacle
- zones : Je stocke dans un tableau les surfaces de chaque zone avec leur identificateur

4.3 Calcul des probabilités de déplacement

4.3.1 Calcul d'un coefficient

Avant de calculer les probabilités, je dois tout d'abord calculer un certain coefficient qui dépendra des caractéristiques de la cellule candidate. Je note :

- $\Delta(\text{porte}) = \text{distance}(\text{porte})_{\text{case_actuelle}} - \text{distance}(\text{porte})_{\text{case_candidate}}$
- $\text{distance}(\text{sortie})$ le nombre de cases minimal à traverser pour parvenir à la sortie définitive la plus proche depuis la case candidate
- $\text{distance}(\text{obstacle})$ la distance à un obstacle si notre humain avance selon cette direction

On note:

$$cp = 5 \times \Delta(\text{porte}) \times \sqrt{\left(2 - \frac{\text{distance}(\text{sortie})}{1.5 \times \text{dimx}}\right) \times \frac{\text{dimx} - \text{distance}(\text{obstacle})}{75}} \text{ et}$$

$$cn = 5 \times \Delta(\text{porte}) \times \sqrt{\frac{\text{distance}(\text{sortie})}{1.5 \times \text{dimx}} \times \frac{\text{distance}(\text{obstacle})}{75}}$$

On prend :

- si $\Delta(\text{porte}) \leq 0$ et $\Delta(\text{sortie}) \leq 0$: $\text{coefficient} = cn$
- si $\Delta(\text{porte}) \leq 0$: $\text{coefficient} = -cp$
- si $\Delta(\text{sortie}) \leq 0$: $\text{coefficient} = -cn$
- sinon $\text{coefficient} = cp$

4.3.2 Calcul des probabilités

Je récupère le coefficient présenté précédemment pour chaque case, puis en fonction du contenu de chaque case, je lui associe :

- si la case est une sortie ou une porte et que la zone d'arrivée est différente de la zone actuelle:
 $score = 10\ 000\ 000\ 000$ (arbitraire)
- si la case est vide: $score = 10\ 000 \times \exp\{(\text{coefficient})\}$
- si il y a une personne sur la case: $score = \text{congestion} \times \exp\{(\text{coefficient})\} \times \text{stress}$ et j'ajoute au score de la case où l'humain est actuellement : $\frac{\exp\{(\text{coefficient})\}}{100}$

Puis je divise le score de chaque case par la somme des scores des cases atteignables.

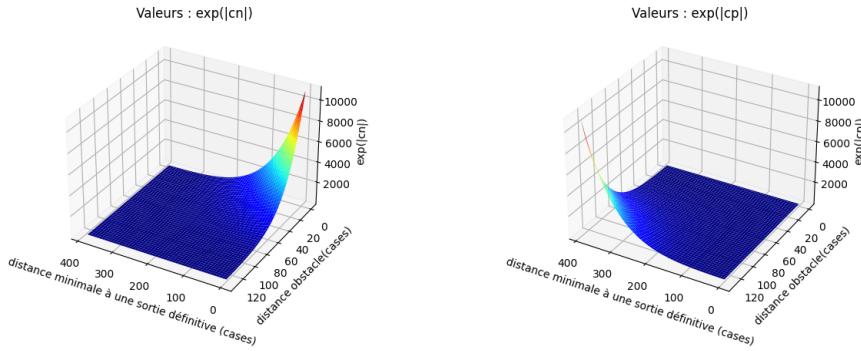


Figure 1: $\exp(|\text{coeff}|)$

4.4 Avancer la population

Pour faire avancer la population :

1. Mélanger le tableau d'humains
2. Parcourir ce même tableau et effectuer ces opération vitesse(= nombre de cases parcouru chaque seconde) fois si l'humain n'est pas sorti:
 - (a) Récupérer le déplacement choisi
 - (b) Avancer l'humain sur cette case, si cette case contient un humain, échanger les positions(et les informations de zones, sorties, et contenu avant l'avancement dans la case) des deux humains, cela modélisera les collisions, sinon replacer dans la case précédente le contenu sauvegardé
 - (c) Vérifier si la personne est sortie

4.5 Complexité

Cette modélisation est bien plus efficace que la précédente car elle peut faire avancer efficacement de larges populations (2000-3000 personnes). La complexité est en $O(dimx \times dimy + \|obstacles\| + \|population\| \times \|sorties\| + \Delta t(evacuation) \times \|population\| \times (\|zones\| + dimx))$

5 Congestions et fluidification de foules

5.1 Congestions pour différents obstacles

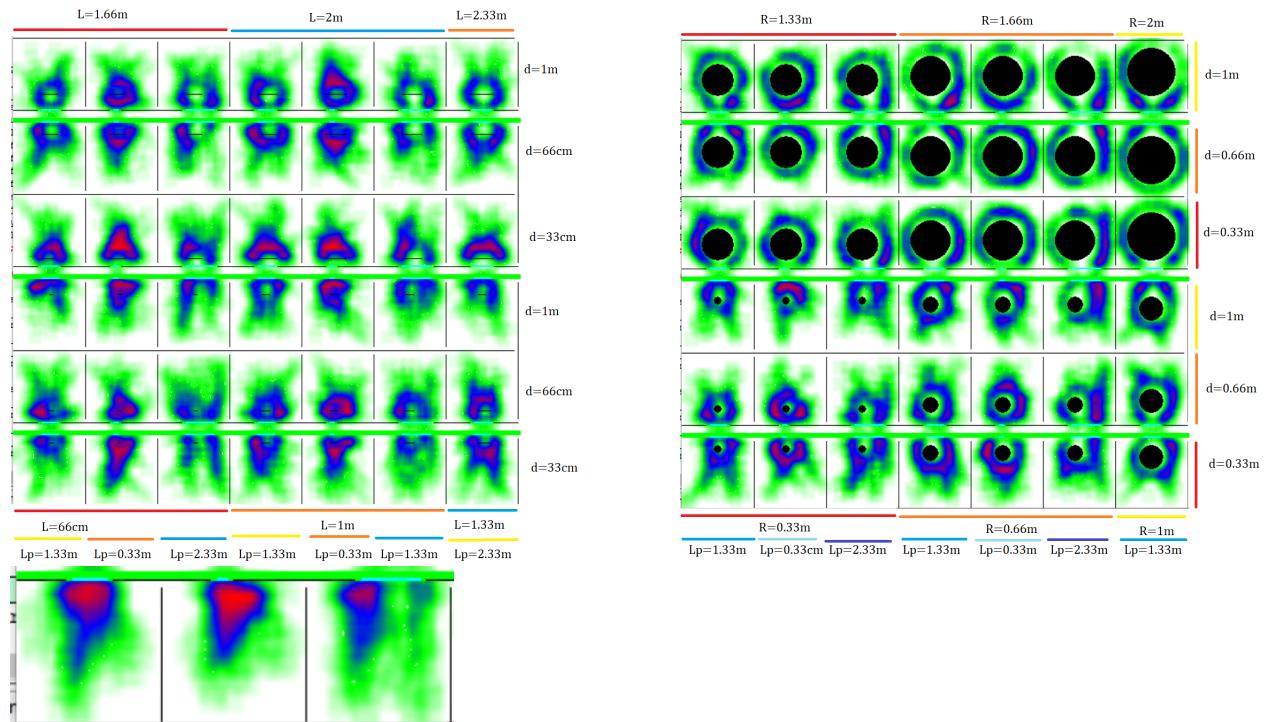


Fig. 2: Congestions : panneaux, poteaux, sans obstacles(50 personnes/pièces, $36m^2$)

5.2 fluidification

L'évacuation est ralentie à cause de l'obstacle, de plus, les poteaux, pour être plus efficaces que les panneaux quant à la congestion et la fluidification de foule, doivent être très larges et donc occuper beaucoup d'espace, les panneaux sembleraient donc plus efficaces, et le sont d'autant plus si ils sont à 66cm de la porte et de largeur supérieure à 2m. Cela est infirmé par [6] mais confirmé par l'étude *Optimal layout design of obstacles for panic evacuation using differential evolution* par Yongxiang Z, Meifang L, Xin L c, Lijun T, Zhiyong Y, Kai H, Yana W, Ting L datant de 2017 et publiée sur ScienceDirect.

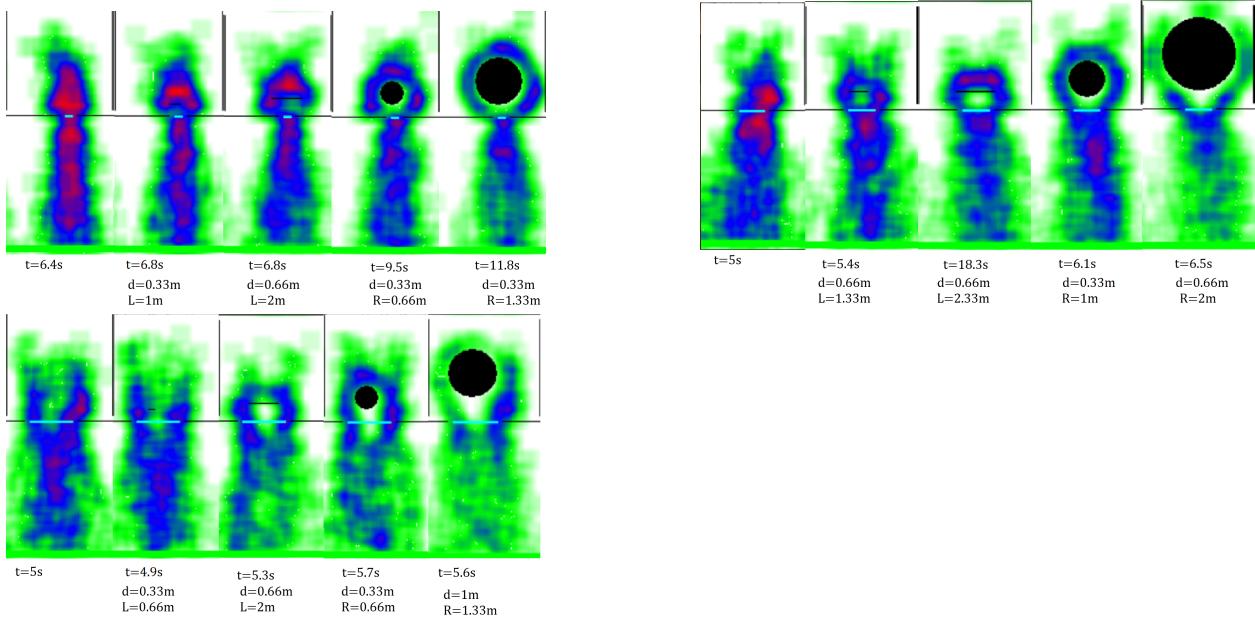


Fig. 3: Obstacles les plus efficaces pour différentes largeurs de porte

6 Simulations concrètes

6.1 Salle de classe: simulation naïve

Temps d'évacuation: entre 4 et 5 secondes; 61 personnes; 100m²(651 pixels=10m);
18 pixels= 28cm <= largeur personne <= 40cm= 26 pixels; 3m/s <= vitesse <= 5m/s

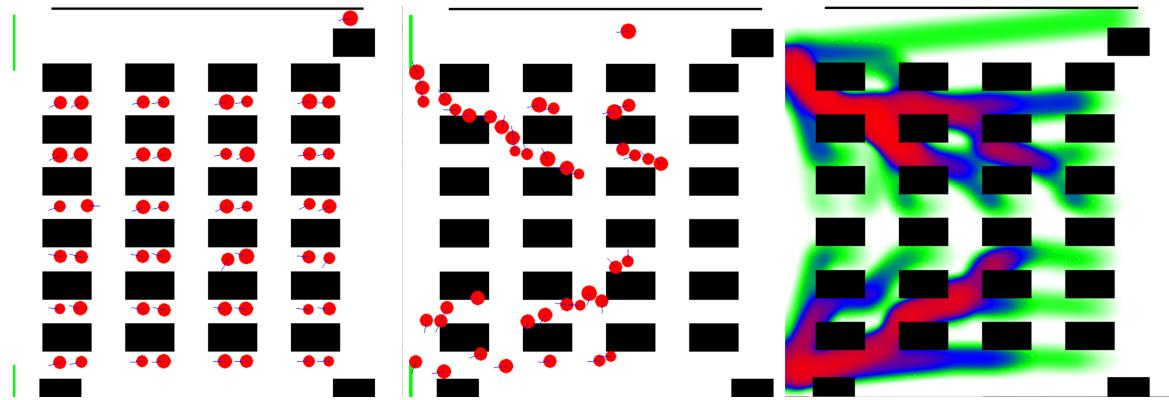


Fig. 4: Salle de classe et congestion

6.2 Établissement scolaire: automate cellulaire

surface: 1849m²; largeur personne: 1 case =33cm car 3 cases = 1 mètre; 3m/s <= vitesse <= 5m/s; inspiré d'un lycée

Avec des personnes hors des classes

Temps d'évacuation: entre 40 secondes et 1 minutes et 20 secondes (en moyenne 48 secondes); 1230 personnes



Fig. 5: Établissement et congestion(1230)

Personne hors des classes

Temps d'évacuation: entre 40 secondes et 1 minute (en moyenne 42 secondes); 630 personnes

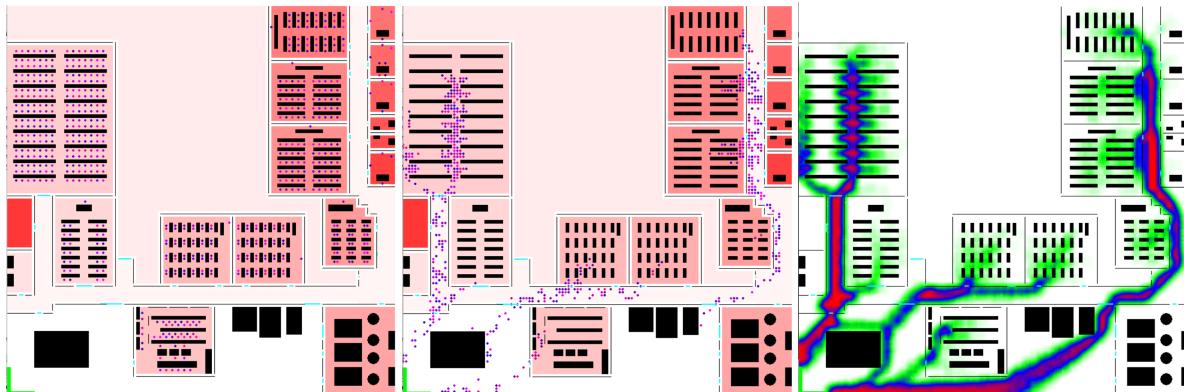


Fig. 6: Établissement et congestion(630)

Il y a très peu de différence entre les temps moyens estimés alors qu'il y a une différence de 600 personnes, cela semble être dû aux hautes congestions au niveau des portes étant donné qu'elles sont peu larges et que beaucoup de personnes doivent les traverser.

Annexe

Données complètes: fluidification de foule

Panneaux

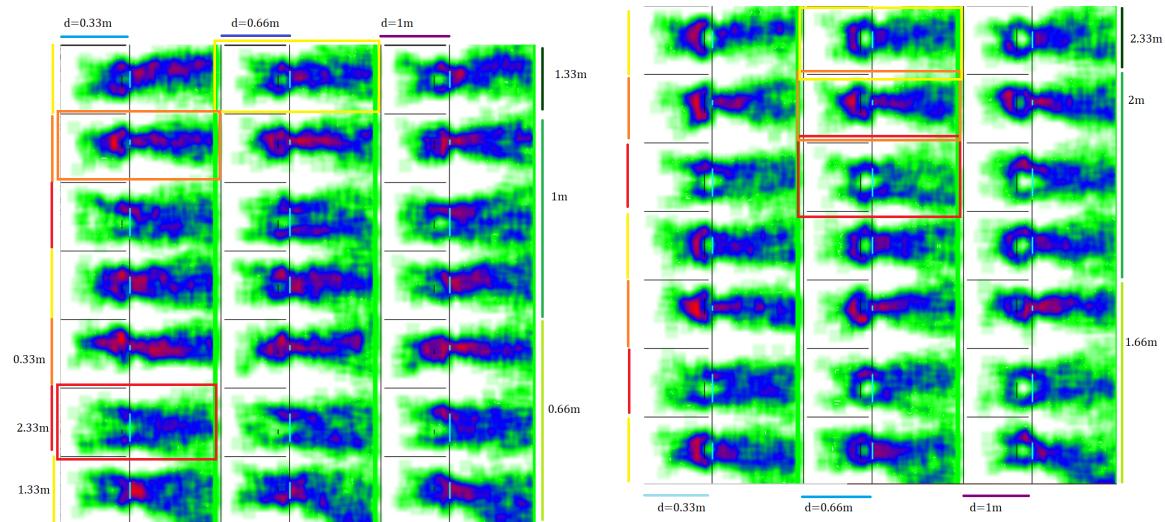


Fig. 7: Congestions

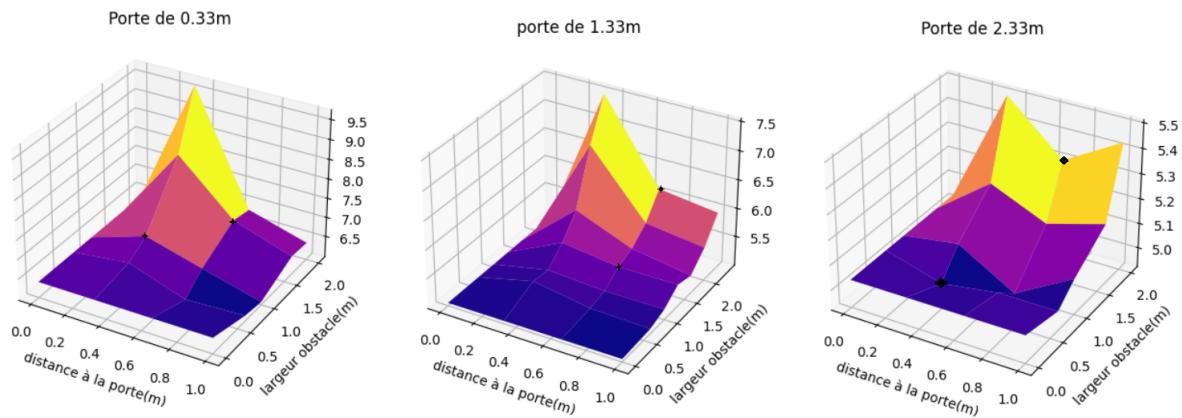


Fig. 8: Temps d'évacuation

Poteaux

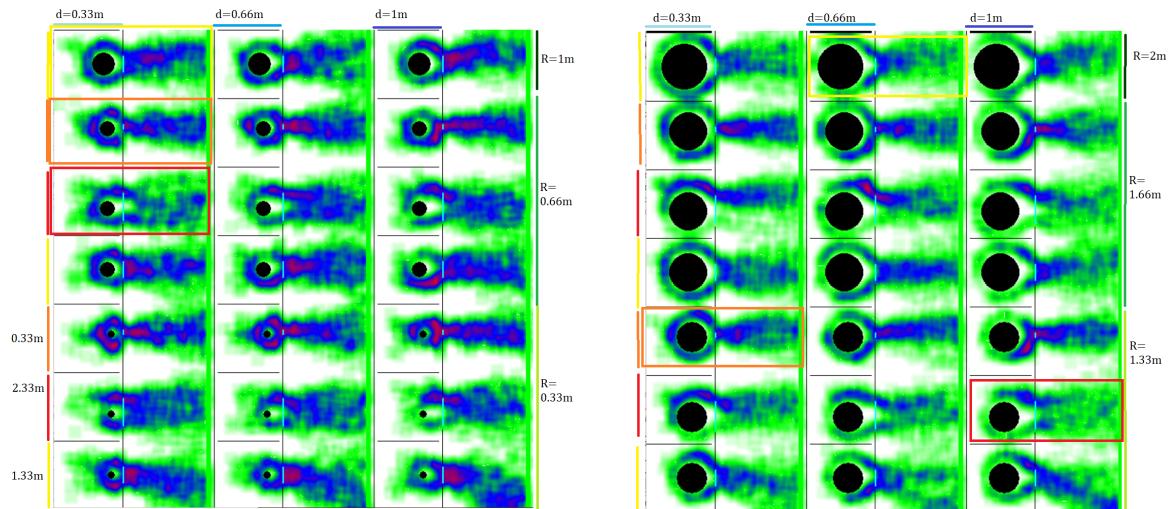


Fig. 9: Congestions

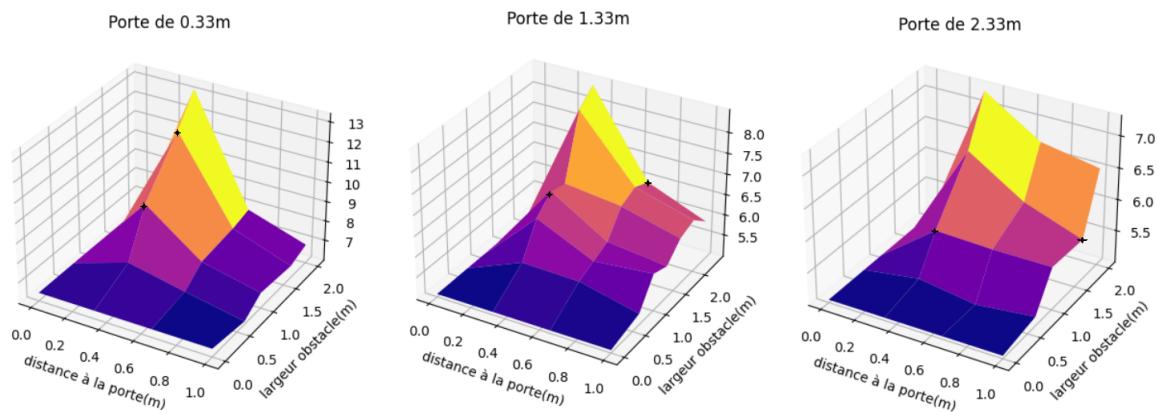


Fig. 10: Temps d'évacuation

Bibliographie

- [1] Projet National de recherche et de développement, *Ingenierie de la Sécurité Incendie: Sécurité des personnes, comportement humain*, 15 octobre 2012, Annexes 3 et 4
- [2] S Lemercier : *Simulation du comportement de suivi dans une foule de piétons à travers l'expérience, l'analyse et la modélisation*, Thèse pour le grade de docteur à l'université Rennes 1, 2012
- [3] Le Bon Gustave : *Psychologie des foules*, Éditions BoD -Books on Demand, réédition réalisée d'après la 40ième édition de 1937
- [4] J Venel : *Modélisation mathématique et numérique de mouvements de foule* thèse présentée pour obtenir le grade de docteur en sciences de l'université Paris XI, 2008
- [5] L Ji, Y Qian, J Zeng, M Wang, D Xu, Y Yan, S Feng : *Simulation of Evacuation Characteristics Using a 2-Dimensional Cellular Automata Model for Pedestrian Dynamics*, Hindawi Publishing Corporation, Volume 13, Article ID 287421, 2013
- [6] C Feliciani, I Zuriguel, A Garcimartín, D Maza, K Nishinari : *Systematic experimental investigation of the obstacle effect during non-competitive and extremely competitive evacuations*, Nature, Article number: 15947, 2020