



# PSC DYNAMIQUE DES PIÉTONS GROUPE PHY 13 – RAPPORT FINAL

Réaction d'une foule dense  
face à un danger ponctuel

30 avril 2018

Mathieu CARON - James CROSS  
Jonathan GAUTHIER - Maxime LOIL  
Guillaume MIANNÉ - Rémy PERRON



## REMERCIEMENTS

---

Nous tenons tout d'abord à remercier Alexandre Nicolas, notre tuteur, X2011 et chercheur au Laboratoire de Physique Théorique et Modèles Statistiques à l'Université Paris-Sud, pour ses précieux conseils, son soutien et sa disponibilité. Nous tenons également à remercier les intervenants internes à l'École, le commandant Auboïs, référent DFHM, les coordinateurs du département de Physique ainsi que tout l'encadrement de l'École. Enfin, nous remercions chaleureusement nos camarades de promotion qui se sont portés volontaires pour participer à nos expériences.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Démarche et organisation</b>	<b>5</b>
2.1	Formation du groupe et choix du sujet . . . . .	5
2.2	Organisation du travail et difficultés . . . . .	6
2.3	Chronologie du projet . . . . .	7
2.4	Fausses pistes . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Etudes préliminaires</b>	<b>10</b>
3.1	État de l'art . . . . .	10
3.2	Automate cellulaire . . . . .	12
3.3	Etude psychologique . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Réalisations expérimentales</b>	<b>16</b>
4.1	Elaboration de l'expérience . . . . .	16
4.2	Réalisation des expériences . . . . .	17
4.3	Présentation des résultats . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Productions finales</b>	<b>20</b>
5.1	Analyse des expériences . . . . .	20
5.2	Conception du modèle . . . . .	24
5.3	Implémentation . . . . .	26
5.4	Étalonnage du modèle . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Bilan</b>	<b>34</b>
6.1	Simulation . . . . .	34
6.2	Compréhension du phénomène . . . . .	37
6.3	Limites . . . . .	38
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>40</b>
<b>A</b>	<b>Annexes</b>	<b>41</b>
A.1	Équations du modèle microscopique issu de [2] . . . . .	41
A.2	Protocole expérimental . . . . .	41
A.3	Protocole de pointage des piétons . . . . .	44
A.4	Diagramme de Gantt . . . . .	45
A.5	Bibliographie . . . . .	46

# 1

## INTRODUCTION

---

Les mouvements de panique dans les foules denses sont toujours impressionnants par l'ampleur des dégâts qu'ils occasionnent. Sept mouvements de foule ont endeuillé La Mecque entre 1990 et 2015 lors du grand pèlerinage annuel à Mina. Le dernier, en date du 24 septembre 2015, a entraîné la mort de plus de 2100 personnes. Plus récemment, le 3 juin 2017, à Turin, lors de la projection en extérieur de la finale de la Ligue des champions, 1500 personnes ont été blessées à cause d'un mouvement de panique.

Ces mouvements de foule sont malheureusement le plus souvent issus de réactions imprévisibles. Néanmoins, si la réaction d'un individu pris seul est souvent imprévisible, le grand nombre diminue la part d'aléatoire, et ce sont souvent les mêmes schémas qui se répètent dans ce genre de situation. L'importance des enjeux sécuritaires liés à ces mouvements de foule motive donc la recherche sur ce sujet, d'autant plus qu'il s'agit d'un domaine où les recherches sont encore peu nombreuses.

Comprendre les mécanismes des mouvements de foule permettrait donc de limiter le nombre d'événements de ce genre, par exemple en déterminant les risques encourus en fonction de la densité de la foule. Pour les organisateurs d'événements, comme les concerts, les festivals ou les fan zones, prévoir les mouvements de foule permettrait de mieux calibrer le nombre et la taille des voies d'évacuation ou d'adapter le positionnement des agents de sécurité et leur nombre pour atteindre la source du problème.

Le sujet étant vaste, sur les conseils de notre tuteur, nous avons décidé de nous concentrer sur une problématique bien précise : **la réaction d'une foule dense face à un danger ponctuel**. Le mouvement de panique de Turin entre parfaitement dans ce cadre, bien que le danger n'ait pas eu d'existence matérielle dans ce cas et ait seulement été imaginé. L'actualité nous a malheureusement donné d'autres exemples où le danger était bien réel. Cette situation s'applique notamment pour les tueries de masse auxquelles s'entraînent les forces publiques de sécurité et secours : en cas de tuerie de masse, il est essentiel pour les forces de police ou de gendarmerie de s'approcher des assaillants le plus rapidement possible, sans entraver l'évacuation des personnes indemnes et sans être ralenties par la foule qui cherche à s'échapper. Prévoir la réaction d'une foule permettrait donc d'intervenir plus rapidement en empruntant des accès qui ne sont pas utilisés pour l'évacuation de la zone de danger.

Nous nous sommes donc engagés sur ce sujet encore peu étudié avec l'appui de notre tuteur mais tout en conservant une grande autonomie dans nos démarches. Nous avons choisi d'en faire un PSC de recherche. Pour mieux saisir les enjeux et les rouages du phénomène de mouvement de foule, nous avons mené des expériences avec une foule réelle, élaboré des modèles théoriques, effectué des simulations numériques et confronté les différents résultats que vous trouverez dans ce rapport.

## 2

# DÉMARCHE ET ORGANISATION

### 2.1 FORMATION DU GROUPE ET CHOIX DU SUJET

Vers la fin du tronc commun, les six membres de notre groupe de PSC se sont rassemblés grâce à une volonté commune de travailler dans **le domaine de la physique**. L'idée de départ était d'étudier la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique de façon originale, c'est-à-dire sans chauffage directe avec un cycle vapeur. Des recherches préliminaires ont permis de trouver plusieurs axes possibles, par exemple l'utilisation de bilames et de capteurs piézoélectriques pour générer de l'électricité à très basse puissance. Après une réunion avec notre coordinateur, nous nous sommes vite rendus compte que ce sujet était beaucoup plus compliqué qu'il n'y paraissait et que de nombreuses recherches avaient déjà été effectuées. Nous avons donc réfléchi à d'autres sujets toujours en lien avec l'électricité ou la thermodynamique mais nos recherches n'ont pas abouti à un sujet définitif.

Après les vacances d'été, un sujet proposé par M. Nicolas sur la **dynamique des piétons** nous a particulièrement intéressés. Nous avons donc décidé de trouver un sujet de PSC en rapport avec ce thème. En effet, la dynamique des piétons relève toujours de la physique, parce que les mouvements sont étudiés par analogie avec ceux des particules dans les systèmes physiques. De plus, il s'agit d'un domaine de recherche relativement nouveau dont certains sujets sont encore peu étudiés. Il existe déjà des études et modèles pouvant servir de base à nos recherches théoriques, et notre tuteur M. Nicolas pouvait nous guider dans nos recherches, étant lui-même spécialisé en mouvement de foule.

Avant de choisir un sujet précis, nous avons regardé de façon globale les différents sujets qui avaient déjà été étudiés dans le domaine de la dynamique des piétons. Il était clair que les sujets liés aux questions de l'évacuation avaient été largement étudiés. Notre tuteur, M. Nicolas, nous a envoyé la vidéo d'**un mouvement de foule déclenché par une fausse alerte dans une fan-zone à Turin**. Dans cette vidéo, il y a visiblement un phénomène de propagation, parce que la perturbation de la foule se déplace de façon radiale en partant du danger. Interpellés par cette vidéo, nous avons décidé d'intituler notre PSC « **réaction d'une foule dense face à un danger ponctuel** ».

L'objectif du projet était de comprendre le phénomène de **propagation** observé dans la vidéo, plus exactement sa cause, son évolution et ses conséquences. L'idée du projet était donc de construire nous-mêmes un modèle physique qui expliquerait ce phénomène en partant d'observations expérimentales, et de réaliser des simulations numériques pour visualiser le comportement des piétons régi par notre modèle. Vu la **multiplicité des paramètres** qui peuvent avoir une influence sur le comportement des piétons en foule dense, et la nature souvent imprévisible

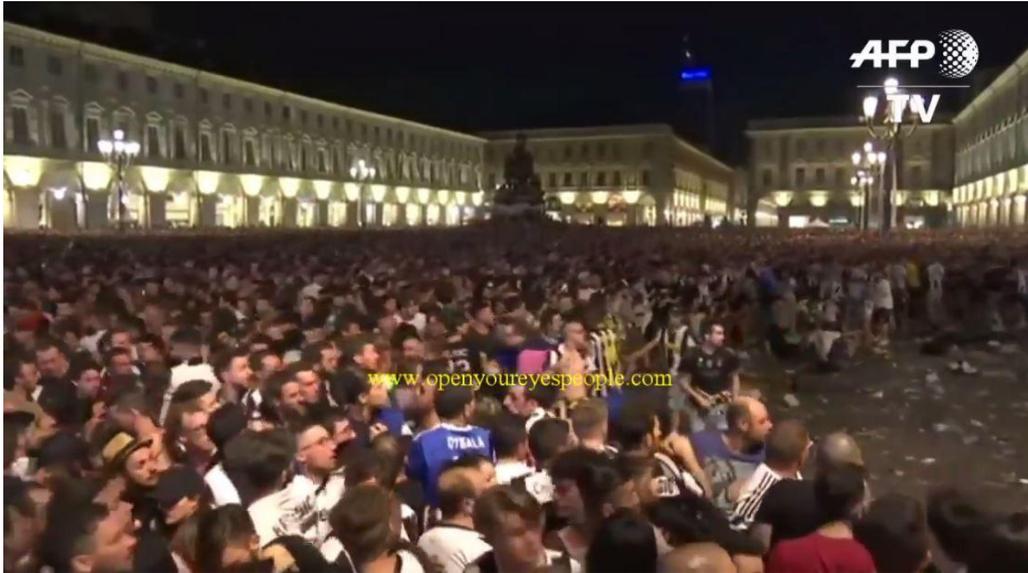


FIGURE 1 – Mouvement de panique collective dans une fan-zone à Turin

et aléatoire du comportement humain, la principale difficulté du projet était d'expliquer un modèle qui permettrait d'expliquer la réalité physique sans être trop complexe.

## 2.2 ORGANISATION DU TRAVAIL ET DIFFICULTÉS

Nous avons rapidement vu émerger divers aspects dans le projet : **modélisation physique, simulation informatique et réalisation des expériences**. Nous avons donc décidé de nous séparer en binômes avançant en parallèle sur des tâches distinctes. Cette organisation a eu l'avantage de l'efficacité : elle nous a permis de livrer des premiers résultats lors de la réunion de cadrage d'octobre. En revanche, afin de garder une dynamique de groupe et de donner la même orientation au travail de chacun, nous avons dû nous réunir toutes les semaines. Le créneau banalisé du mercredi a été consacré à la majorité du travail de ce projet, quoique nous ayons travaillé le reste de la semaine lorsque les échéances que nous avons fixées l'exigeaient. L'organisation de notre travail et des réunions était facilitée par le fait que nous nous voyions assez souvent en dehors du cadre du PSC.

Au début du projet, nos réunions pouvaient durer assez longtemps et perdre en efficacité sur la fin, notamment à cause de la bonne entente régnant dans le groupe. Nous avons donc pris l'habitude de **formaliser ces réunions**. Un maître de séance annonçait l'ordre du jour établi pendant la semaine en accord avec le reste du groupe. Puis, chacun donnait un aperçu de ses propres avancées. Des questions concernant l'orientation générale du projet ou des difficultés particulières étaient ensuite traitées. Enfin, nous nous fixions des objectifs à atteindre pour la réunion suivante.

Nous avons aussi **communiqué avec notre tuteur**, M. Nicolas, toutes les trois semaines environ via des échanges de mails, des entretiens téléphoniques ou des réunions en fonction des questions que nous avons à lui poser. Cela a beaucoup apporté à notre projet. Il nous a évité certaines fausses pistes et nous a donné du recul sur ce qui était réalisable et ce qui ne l'était pas. Avec un tel sujet, nous avons risqué à plusieurs reprises de nous consacrer à l'informatique à outrance, avec des simulations détachées de la réalité, ou au contraire de rester dans les spéculations loin de toute rigueur scientifique. M. Nicolas a insufflé le plus de physique possible à notre démarche. Il nous a aussi permis d'économiser du temps en nous partageant son expérience sur des aspects du projet assez techniques comme l'analyse des vidéos d'expérience.

Malheureusement, cette organisation efficace a été perturbée par les **dévoiements des créneaux PSC du mercredi**. Nous avons peut-être manqué de flexibilité, mais un véritable ralentissement de la dynamique se ressentait lorsqu'un cours ou une conférence avait lieu le mercredi après-midi. Une autre difficulté ressentie était liée à notre **autonomie quasi totale** durant ce projet. C'était à nous de nous fixer nos propres échéances, ce que nous avons fait avec moins de rigueur dans les périodes de l'année où notre emploi du temps était plus dense.

Dans l'ensemble, nous avons malgré tout su analyser ces défauts et les corriger suffisamment vite pour avancer.

## 2.3 CHRONOLOGIE DU PROJET

Un premier planning prévisionnel a été établi pour la proposition détaillée rédigée en septembre. Notre intention première était de **préparer la première série d'expériences** : tandis qu'un binôme s'occupait de la logistique et des démarches pour sa réalisation, les deux autres ont essayé d'anticiper les résultats de l'expérience et de comprendre les mécanismes qui régissent les mouvements de foule, c'est pourquoi un binôme a étudié les modèles théoriques de dynamique des piétons et un autre a réalisé un automate cellulaire simulant les mouvements de foule.

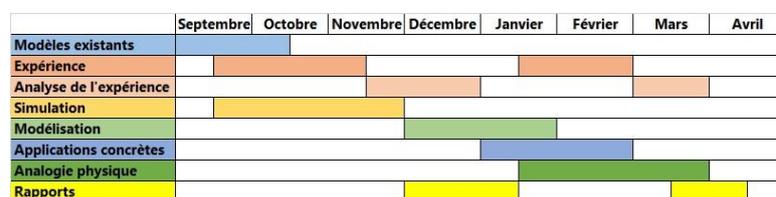


FIGURE 2 – Planning prévisionnel du PSC réalisé en septembre

Le planning établi a été respecté jusqu'à ce qu'apparaissent les premières difficultés liées à la disponibilité du Grand Hall de l'École polytechnique où nous souhaitions réaliser nos expériences : divers événements nous ont en effet empêchés de réaliser l'expérience, ce qui a retardé notre avancement. **L'analyse de l'expérience a également pris plus de temps**

**que prévu**, compte tenu des difficultés liées à l'angle de vue et à la perspective (voir partie 5.1).

En parallèle de l'analyse des expériences, un binôme s'est attelé à la **mise au point de modèles** (voir partie 4.2), en accord aussi bien avec les modèles existants qu'avec les premières expériences réalisées, tandis qu'un autre binôme étudiait les logiciels de simulation de dynamique piétonne existants. Au moment de la remise du rapport intermédiaire en janvier, le groupe a établi un diagramme de Gantt corrigé, disponible en annexe A.4.

Un binôme a rencontré différentes personnes du monde de la **psychologie** pour essayer d'analyser le phénomène d'un point de vue différent. De ces échanges et suivant les conseils du Commandant Aubois et de M. Nicolas, il s'est révélé nécessaire de réaliser une nouvelle série d'expériences pour augmenter le nombre de résultats et pour tester de nouveaux aspects liés aux mouvements de foule (voir partie 4.2). Un binôme s'est par conséquent attelé à la préparation de la nouvelle série d'expériences, tandis que les autres ont continué de travailler sur la simulation numérique (voir partie 5.3). La dernière étape fut le traitement des nouvelles données acquises, ainsi que le calibrage du modèle pour qu'il rende compte le plus fidèlement possible des expériences réalisées.

## 2.4 FAUSSES PISTES

---

Au cours du projet, nous avons eu plusieurs idées d'expériences ou d'axes de recherche qui se sont avérées infructueuses.

Nous avions initialement l'intention de réaliser des expériences en laboratoire avec des particules en milieu granulaire ou des fluides, l'objectif étant d'illustrer l'analogie avec le comportement des piétons. Cependant, **nous n'avons finalement pas réalisé ces expériences**. En effet, l'analogie entre les systèmes physiques et la dynamique des piétons est assez simplifiée, les deux restant très différents. Il aurait été difficile de trouver une expérience réellement en rapport avec notre sujet, qui imiterait bien le comportement des piétons. Les seules expériences envisageables auraient été très simples avec des résultats triviaux. Le but aurait donc été purement illustratif, sans apport réel au contenu scientifique.

Un autre objectif de départ du projet était de **se mettre en contact avec des spécialistes en sécurité** tels que la gendarmerie ou des entreprises comme Thalès qui auraient pu nous fournir des informations sur les mesures de sécurité en vigueur pour l'organisation de grands événements et pour la construction de grandes structures. Nous avons finalement décidé qu'il serait plus judicieux de se mettre en contact avec **des spécialistes en sciences cognitives** parce qu'ils pourraient nous apporter des éléments plus scientifiques et cohérents avec notre expérience. Il y avait aussi le fait que la plupart des mesures de sécurité déjà mises en place concernent les questions d'évacuation ou de déplacement et dispersion de foules. Or, la situation que nous étudions est très spécifique et il aurait été difficile de trouver des renseignements pertinents. Vers la fin du projet, nous avons préféré consacrer le temps qu'il nous restait à

l'aspect purement scientifique.

Au vu de la durée totale des vidéos que nous analysons qui était faible par rapport à nos attentes initiales, il aurait été intéressant d'analyser d'autres vidéos de mouvement de foule que celles de notre expérience, mais il n'est pas aisé d'en trouver. En effet, un grand nombre de vidéos sont disponibles sur internet et montrent des phénomènes intéressants de dynamique de foule dans des situations réelles comme des concerts ou des manifestations, mais **il y en a très peu qui correspondent exactement à la situation que nous voulions étudier**. De plus, celles qui correspondent à notre situation sont quasiment inexploitable à cause de la piètre qualité des images et des problèmes de perspective. Nous avons donc renoncé à analyser ces vidéos.

# 3

## ETUDES PRÉLIMINAIRES

---

### 3.1 ÉTAT DE L'ART

---

Le point fort de notre PSC est de se situer à la frontière des connaissances scientifiques en traitant un problème nouveau. L'analyse de l'état de l'art est donc inévitable pour connaître ce qui a déjà été étudié et pour ne pas retraiter de tels sujets, mais plutôt pour s'appuyer dessus.

Rappelons que la dynamique des piétons est en fait **un problème étudié récemment**, les premières formulations mathématiques datant des années 1960. Un piéton étant un système complexe, les premières études ont donc choisi une modélisation simple mais pertinente : les modèles macroscopiques, où la modélisation est très proche de la physique classique. En effet, dans de tels modèles, la description est faite à l'échelle de la foule. A partir des années 1980, une seconde grande catégorie est apparue avec notamment l'émergence des simulations numériques : les modèles microscopiques, qui décrivent les entités individuelles.

#### Modèles macroscopiques :

- **Modèle gazeux d'Henderson** : ce modèle de physique classique approche les piétons par des particules classiques avec de faibles interactions. Issu de la physique statistique, il donne donc des résultats corrects dans la limite des faibles densités de foule (cf [10]).
- **Modèle de flots** : ce modèle de la mécanique des fluides traite le problème avec une description totalement continue (champs de vitesse, champs de densité...). De même qu'en mécanique des fluides, le choix de modélisation est simple et efficace dans la limite des faibles perturbations. Au-delà, la non-linéarité des équations rend l'analyse hautement complexe (cf [9]).

#### Modèles microscopiques :

- **Modèle des automates cellulaires** : ce modèle de simulation informatique est très employé pour sa simplicité d'implémentation et son faible coût en calcul. La zone de déplacement des piétons et le temps sont discrétisés. L'évolution des piétons d'un pas de temps se fait par des règles simples de voisinage. La modélisation se fait donc par des interactions locales. La précision est limitée, mais ce modèle rend cependant compte des motifs de phénomènes classiques, comme dans [4].
- **Modèle des forces sociales** : ce modèle de la physique classique considère les piétons comme des disques, dont la dynamique est régie par un ensemble de forces rendant compte de quelques interactions réelles entre piétons. Par exemple, les disques interagissent de manière répulsive avec un potentiel décroissant exponentiellement avec leur séparation. L'approche newtonienne donne de bons résultats, et c'est pourquoi ce modèle

est le plus utilisé actuellement. Cependant le nombre élevé de leurs paramètres les rend complexes et difficiles à calibrer (cf [1] et ci-dessous).

- **Modèle d’optimisation de la vitesse** : ce modèle mathématique-économique est fondé sur l’axiome suivant : chaque piéton tente de minimiser une fonction d’inconfort calculée à partir de facteurs de bons sens (distance, temps de parcours, désagrément. . .) (voir A.1). Les différents obstacles sont modélisés par un gradient de potentiel. Ce modèle est notamment présenté dans le mémoire [2].
- D’autres modèles ont été développés par analogie avec la **mécanique des milieux granulaires** pour rendre compte des phénomènes d’apparition d’arches devant les sorties exiguës (*clogging*) (cf [11]).

## • ÉQUATION DU MODÈLE DES FORCES SOCIALES

$$m_i \ddot{\vec{\gamma}}_i = \sum_{j \neq i, \gamma_j(t) \in E_i(t)} \frac{\mu_p (\vec{\gamma}_i(t) - \vec{\gamma}_j(t))}{(\|\vec{\gamma}_i(t) - \vec{\gamma}_j(t)\| - \epsilon)^p} + \frac{m_i}{\tau_i} \left( v_{\max, i} \frac{\vec{\gamma}_i(t) - \vec{\gamma}^{\text{danger}}}{\|\vec{\gamma}_i(t) - \vec{\gamma}^{\text{danger}}\|} - \dot{\vec{\gamma}}_i(t) \right) + \vec{\xi}_i(t)$$

où ces termes représentent respectivement de gauche à droite :

1. les forces appliquées aux piétons
2. la répulsion entre piétons
3. l’éloignement par rapport au danger
4. les fluctuations aléatoires

### Définition des grandeurs :

- |   |  |
|---|--|
| — $m_i$ : inertie représentative du piéton $i$        | — $\vec{\gamma}_i(t)$ : position du piéton $i$ à l’instant $t$ |
| — $\tau_i$ : temps de réaction du piéton $i$          | — $E_i(t)$ : zone visible par le piéton $i$                    |
| — $\epsilon$ : distance minimale entre deux piétons   | — $\vec{\xi}_i(t)$ : fluctuations aléatoires                   |
| — $v_{\max, i}$ : vitesse maximale du piéton $i$      | — $p$ : coefficient de repoussement                            |
| — $\vec{\gamma}^{\text{danger}}$ : position du danger | — $\mu_p$ : constante de normalisation                         |

Différentes études plus proches de notre sujet d’étude ont été récemment réalisées par différentes équipes de recherche et entreprises.

- Eric LEIJONMARCK et Thomas OLERGARD [8] ont modélisé **l’influence de la panique en situation d’urgence**. Le modèle choisi dans cette étude est CEPABS (*Crowd Evacuation Panicking Agent Building Simulation*). Une fonction de panique est introduite, dont les quatre paramètres régissant son évolution sont : le niveau de panique des autres piétons, les différences de vitesse, la solitude et la frustration.
- Alexandre NICOLAS et al. [4] ont intégré à **un modèle d’automate cellulaire** des phénomènes de propagation de comportements au sein d’une foule. Ce modèle prend en compte des phénomènes de paniques et de contagion par réaction psychologiques.
- Samuel LEMERCIER [5] a étudié les phénomènes de **vagues de densité et de vitesse** (*stop-and-go*) qui peuvent survenir dans les foules denses.

- La société THALES [6] développe un logiciel fondé sur le **modèles des forces sociales** qui serait capable de simuler jusqu'à 30 000 personnes. Ce logiciel permettrait notamment aux entreprises de bâtiment de vérifier que les normes de sécurité sont respectées.

Pour ce qui est de l'expérimental, l'utilisation de la vidéo et de logiciels toujours plus performants a simplifié les **collectes de données**. Ainsi certains comportements ont été observés dans des lieux d'affluence forte, et d'autres ont pu être reproduits dans des lieux fermés sous la supervision des volontaires par les chercheurs. Il s'agit notamment de l'effet d'*arching* et du *faster-is-slower effect* (cf [8]). L'utilisation de la Kinect<sup>TM</sup> (caméra à profondeur de champ avec capteur infrarouge) a permis à Alessandro CORBETTA et al. [3] d'automatiser la détection des piétons. D'autres méthodes fondées sur le traitement du flux optique (mouvement apparent des objets, surfaces et contours d'une vidéo, calculé avec les changements relatifs de pixels) des vidéos classiques [7] ont vu le jour. Ces outils permettent l'obtention de statistiques sur les différentes situations observées : vitesse moyenne des piétons, flux de piétons, densité, probabilité d'apparition de structures.

## 3.2 AUTOMATE CELLULAIRE

---

L'une de nos premières réalisations a été **un automate cellulaire**, c'est-à-dire une simulation informatique à espace et temps discrets : les piétons y sont astreints à se déplacer sur une grille, de case en case, au tour par tour. Cet automate n'avait pas vocation à être le produit final de notre PSC, mais il nous a permis de mieux comprendre **les paramètres importants** pour les phénomènes que nous étudions (densité des piétons et mode de transmission de l'information) et de **dimensionner les expériences**, en terme de densité de foule et de géométrie.

Notre automate est capable de générer un potentiel de danger (en rouge sur les figures 3 et 4) selon deux méthodes : simple distance au danger ou bien distance à la sortie la plus proche tout en « **dilatant** » **les distances à proximité du danger**. Il peut intégrer des obstacles (en gris) et gérer une **propagation de l'information** « **présence du danger** » dans la foule (les piétons verts sont conscients du danger, les bleus ne le sont pas). Enfin, un compteur de piétons sortis à chaque tour nous permet d'évaluer la qualité d'une évacuation.

Les règles de l'automate sont très proches de celles employées dans l'article [4]. Les règles sont les suivantes :

- Avant toute chose, un potentiel de danger est généré (le détail de cette génération est donné plus bas).
- À l'instant initial, seuls les piétons dont la distance au danger est inférieure à un rayon donné ont conscience de son existence.
- À chaque tour, chaque piéton choisit de se déplacer sur une case parmi les cases adjacentes (qui ne sont pas des obstacles) et celle où il se trouve. Le choix de cette case  $C$  se fait totalement aléatoirement s'il n'est pas conscient du danger. Sinon, il se fait selon

une probabilité dépendant du potentiel, de la forme :

$$\frac{1}{K} \times \exp\left(\frac{\text{potentiel}(\text{position}(t)) - \text{potentiel}(C)}{\text{bruit}}\right)$$

- Si deux piétons ont choisi la même case, aucun ne se déplace.
- **Transmission de l’information** Les piétons ayant été au contact d’un piéton conscient du danger passent eux-même dans l’état « conscient du danger » à la fin du tour.
- **Sortie** Un piéton atteignant le bord de la grille sort et n’est plus pris en compte par la simulation.

Le potentiel peut être généré de deux manières :

- Ou bien simplement par l’opposé de la distance au danger de la case.
- Ou bien au moyen d’un parcours en largeur de la grille, à partir des cases de sortie, pondéré par la « proximité au danger ». Celle-ci est définie par :  $\max(1, (d_{max} - \text{distance}(\text{danger}, \text{case})) * A)$ , où  $d_{max}$  est la distance séparant le danger de la case qui en est la plus éloignée, et  $A$  est une constante permettant d’ajuster les effet relatifs de la proximité au danger et de la distance à la sortie la plus proche.

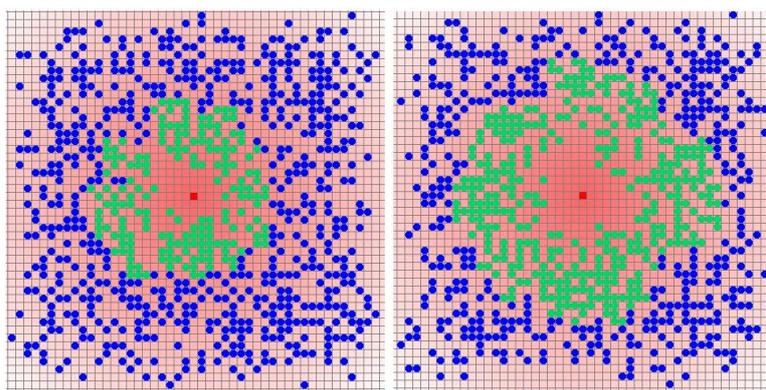


FIGURE 3 – Simulation circulaire

La figure 3 présente une simulation réalisée à partir de cet automate dans une géométrie circulaire. Elle est analogue à ce qui peut se produire sur une place moyenne, ouverte, et densément peuplée. Elle s’approche de la vidéo de la vague de panique à Turin qui nous a inspirés pour ce sujet. On observe dans que les piétons verts sont plus enclins à avoir un mouvement radial que les piétons bleus, comme défini par leur probabilité de déplacement, mais surtout que **leur fuite est ralentie par les piétons bleus jusqu’à ce que ceux-ci aient tous pris conscience du danger**. Cela montre le rôle crucial joué par la propagation de l’information sur la fuite globale de la foule.

La figure 4 présente une seconde simulation, dans une géométrie linéaire, qui vise à reproduire une des expériences que nous avons menées. Là encore, on observe **un ralentissement de la fuite lié à la propagation de l’information**.

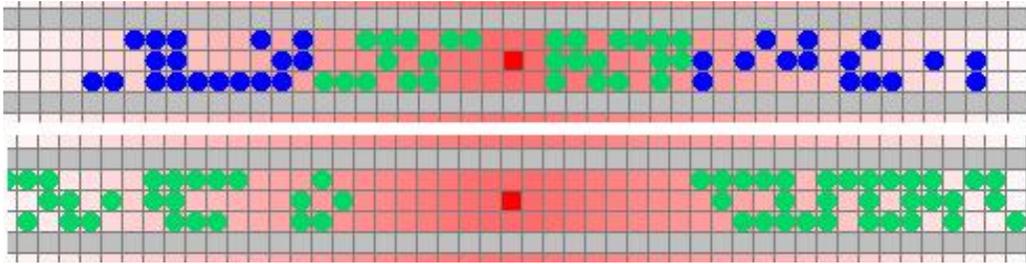


FIGURE 4 – Simulation rectiligne

La grande réussite de ce modèle simple est d'être parvenu, à partir de lois de déplacement des agents et de propagation de l'information peu complexes, à recréer cette « vague » de panique que nous cherchons à étudier. Dans cette vague, les piétons proches du danger qui veulent fuir sont **ralentis dans leur course** par ceux qui, plus éloignés, ne savent pas encore ce qui se passe. Nous avons simulé grâce à l'automate les situations étudiées lors de nos expériences, avec des résultats qui semblent relativement proches de ce que nous avons observé, quoique nous n'ayons pas quantifié cette proximité.

Néanmoins, ce modèle trop simple présente des limites. Les « embouteillages » observés sont très liés à **la géométrie en grille**. En effet, dans le cas d'une fuite sans obstacle, circulaire, les piétons ne peuvent pas se déplacer radialement par rapport au danger, ce qui crée des trajectoires en « zig-zag » et des ralentissements artificiels.

De plus, tout dans ce modèle est très **uniforme** : les piétons ont tous la même vitesse, l'information ne se propage que de proche en proche et les phénomènes de compression sont limités par la présence de la grille. Cela ne permet ni de rendre compte de toute la richesse des situations qui peuvent émerger dans une foule, ni de laisser place aux variations individuelles de comportement, ni enfin d'explicitier les phénomènes physiques à l'origine des situations qui nous intéressent. Pour ces raisons, il nous semblait nécessaire de développer un modèle où les agents pourraient se déplacer librement, de façon continue.

En l'état, les résultats de l'automate sont uniquement **qualitatifs**, et non quantitatifs. Pour calibrer correctement l'automate et vérifier la pertinence de cette manière de reproduire les phénomènes, il aurait fallu comparer les simulations à nos données expérimentales. Ce travail complexe a été mené sur le modèle que nous avons développé par la suite, mais nous ne l'avons pas appliqué à l'automate.

Nous avons employé l'automate pour **tester qualitativement, avant nos expériences, les situations, les géométries et les densités de piétons qu'il était utile d'étudier**. Il nous a donc permis de dimensionner nos expériences. En outre, sa conception et l'observation de ses limites ont été **utiles dans l'élaboration du modèle plus abouti que nous avons réalisé par la suite**, présenté dans la partie 5.3.

### 3.3 ETUDE PSYCHOLOGIQUE

---

Lors de notre étude du phénomène, nous nous sommes demandé quel était **l'impact de la dimension psychologique** sur la réaction d'un individu. Après une première réflexion, nous ne trouvons pas d'élément ou de caractéristique propre à un individu permettant d'affiner sa réaction face à un danger.

Nous avons ainsi commencé par rechercher dans la littérature les études étudiant ces facteurs. L'ouvrage de Gustave Le Bon, *Psychologie des foules*, paru en 1895, montre que le comportement d'individus réunis n'est pas le même que lorsque les individus raisonnent indépendamment. Selon lui, **une foule est plus primaire et univoque qu'un simple agrégat d'individus**. Pour qu'un agrégat d'individus devienne réellement une foule, il faut que les individus aient des motivations communes. Dans notre cas, il s'agit de la fuite face au danger. Le Bon identifie trois caractères qui distinguent l'individu appartenant à une foule d'un individu seul :

1. **l'irresponsabilité**, l'individu ressent un sentiment de puissance invincible en groupe
2. **la contagion**, un sentiment ressenti par une partie de la foule se propagera au reste avec une grande intensité
3. **la suggestibilité**, la conscience propre à l'individu diminue en intensité au profit de l'opinion global, des foules peuvent alors prendre des décisions allant à l'encontre des intérêts de chacun.

Le Bon identifie un autre caractère intéressant pour notre étude, **l'imagination des foules**. En effet, les membres d'une foule perdent de leur raisonnement logique et deviennent capables d'établir des associations d'idées parfois paradoxales. Cet effet peut être observé sur des mouvements de foule naissant à partir de l'imagination de quelques personnes et pouvant avoir des conséquences catastrophiques en causant de nombreux blessés. L'étude de la littérature nous a permis de prendre conscience de l'existence de différents phénomènes qu'il sera nécessaire de prendre en compte lors de la réalisation de notre modèle. Il est ainsi indispensable de considérer **l'influence des individus entre eux**, notamment au moyen de la contagion.

Pour préciser nos premières conclusions, nous avons pris contact avec Monsieur Jérôme Sackur, chercheur au Laboratoire de Sciences Cognitives et Psycholinguistique de l'École Normale Supérieure Ulm. Après lui avoir détaillé nos intentions ainsi que les premières expériences réalisées, il a insisté sur la nécessité de **varier les données** dont nous disposons. Il nous a notamment conseillé de modifier les modes de contagion et la nature du danger lors de nos prochaines expériences. Selon lui, **la dimension psychologique n'est que secondaire dans l'établissement de notre modèle**. En effet, l'influence de la réaction instinctive prédomine sur les caractéristiques de chaque individu. Il n'est donc pas nécessaire d'ajouter des caractéristiques psychologiques à chaque individu dans notre modèle. Monsieur Sackur a aussi insisté sur le fait que nous disposons de peu de données et qu'il serait donc difficile d'étalonner correctement le modèle établi.

## 4

# RÉALISATIONS EXPÉRIMENTALES

## 4.1 ELABORATION DE L'EXPÉRIENCE

De nombreuses réflexions ont été menées lors de l'élaboration du protocole fixant les modalités de réalisation de nos premières expériences. Ces réflexions nous ont menés à certains compromis détaillés dans cette partie. Avant de débiter, nous avons d'abord demandé conseil à notre tuteur pour avoir l'avis d'une personne ayant déjà réalisé ce genre d'expérience. Idéalement, chaque situation doit être **réalisée un grand nombre de fois** pour pouvoir élaborer des statistiques pertinentes. Un **traitement automatique** des données est conseillé pour éviter un travail fastidieux de pointage manuel de chaque piéton. Enfin, les participants doivent constituer un **panel représentatif** de la population.

### Financement et recrutement du panel

Pour collecter suffisamment de données, il aurait été nécessaire d'avoir une centaine de participants disponibles pour réaliser chaque situation quelques dizaines de fois, soit environ deux heures d'expérience. Nous nous sommes rapidement rendu compte que **nous ne serions pas en mesure d'attirer assez de volontaires bénévoles** pour réaliser un nombre aussi important d'expériences. Nous avons alors envisagé de récompenser chaque participant.

Nous avons donc contacté le service de **financement** des PSC afin de discuter de cette éventualité. La rémunération d'un panel aurait été possible, mais contraignante. De plus, nous ne pouvons pas utiliser les mêmes personnes pour réaliser autant d'expériences, l'effet de surprise aurait disparu et il n'aurait plus été possible d'observer une réaction spontanée. Nous avons donc décidé d'écarter cette solution car elle n'était pas conforme à nos attentes.

Sans contrepartie, il nous était impossible de réaliser un si grand nombre d'expériences avec autant de participants. **Notre seule ressource en termes de panel était les élèves de l'école.** Ce panel n'était pas idéal car composé uniquement de jeunes adultes et donc peu représentatif de la population. Pour ne pas décourager les participants, nous avons décidé de réduire la durée de chaque série d'expérimentation à 15 minutes, soit 4 expériences réalisables.

Pour avoir **le plus grand nombre de participants possibles**, nous avons décidé de réaliser les séries d'expériences entre les deux cours en amphithéâtre de l'après-midi. Pour assurer une participation minimale, fixée à 35 participants, nous avons décidé d'offrir aux participants une collation.

### Prises de vues

Initialement, nous envisagions de filmer par l'intermédiaire d'une caméra Kinect<sup>TM</sup>. Celle-ci a

l'avantage de fournir le champ de profondeur et permet un traitement automatisé des positions des piétons à chaque instant. Mais cette solution technologique possédait aussi de nombreux inconvénients pratiques. Le champ de vision exploitable de cette caméra est d'environ 9 m<sup>2</sup> et le programme de traitement automatique des données nécessitait de nombreuses corrections. L'aspect informatique aurait pris le dessus sur l'aspect physique qui nous intéresse davantage. **Nous avons alors préféré utiliser une caméra Go-Pro<sup>TM</sup> qui a l'avantage de posséder un large champ de vision.** Seul le traitement des données est plus fastidieux puisque le pointage des piétons se réalise manuellement.

### Choix du danger

Dans le souci de se rapprocher au plus près des conditions réelles, nous souhaitions utiliser une arme factice tout en le signalant aux participants. Cependant, cette idée ne plaisait pas au service de sécurité qui avait peur que les gens passant dans le grand hall s'inquiètent. Nous avons pris la décision d'utiliser **des objets de couleur rouge** que la personne incarnant le danger ponctuel sortirait de son manteau, tout en précisant que cet objet représentait un danger de mort. Nous avons assuré que le porteur du danger ait connaissance du signal.

### Choix de la géométrie

Il nous semblait naturel de placer les participants dans une **zone de forme carrée** et de déclencher le danger dans cette zone, nous aurions alors vu les piétons s'écarter du danger. Cependant, vu le nombre limité de participants, notre tuteur nous a conseillé de réaliser des expériences dans **un couloir étroit** pour compléter les données issues des expériences où la zone initiale est un carré. En effet, cette configuration permet de mieux répartir les participants, ils ne sont pas tous proches du danger. Ainsi, il est plus facile d'observer la propagation de l'information des piétons proches du danger vers ceux qui sont plus éloignés. Nous avons donc utilisé ces deux types de géométrie. Pour observer l'influence de la densité, nous avons disposé des zones initiales plus ou moins grandes pour chaque configuration.

## 4.2 RÉALISATION DES EXPÉRIENCES

Pour disposer d'une quantité de données suffisantes pour calibrer notre modèle, nous avons réalisé **deux vagues d'expériences**.

### Première vague d'expérience (décembre 2017)

Pour ne pas perdre de temps le jour J, nous avons minuté et détaillé nos actions. Nous avons ainsi réussi à ne pas utiliser plus de 15 minutes (temps dont disposaient nos cobayes entre deux cours) pour réaliser ces expériences.

Les détails de l'expérience se trouvent en annexe A.2 (Protocole expérimental).

Le lendemain, lors de la deuxième série d'expériences, nous avons amélioré la position au sein du grand hall de l'expérience dans le couloir car nous nous sommes rendu compte que celle occupée lors de la première série n'était pas optimale, notamment au niveau de la prise de vue.

## Deuxième vague d'expérience (mars 2018)

La deuxième vague d'expériences nous a permis de diversifier nos données. Nous avons amélioré notre protocole afin d'être plus efficace, que ce soit pour le positionnement des piétons ou pour la captation vidéo. Les changements étaient les suivantes :

- **Choix du créneau** : nous avons profité d'un amphi réunissant une grande partie de la promotion pour garantir un minimum de participation. Nous avons ainsi atteint une participation d'environ quatre-vingts personnes.
- **Communication** : pour motiver les personnes présentes lors de l'amphi, deux d'entre nous sont montés sur scène pour présenter notre projet.
- **Choix du point de vue pour filmer** : Lors de la première vague d'expériences, nous avons eu des difficultés à exploiter les données (cf IV.1) à cause du point de vue adopté pour placer la caméra. Pour éviter de réitérer les mêmes erreurs, nous avons décidé de suspendre la caméra à la verticale sous les passerelles situées près du plafond du Grand Hall de l'école.
- **Diversification des modes de contagion** : Nous nous sommes munis d'une sirène pour modifier le mode de contagion entre les piétons. Lors de deux des trois expériences, le signal émis par l'individu représentant le danger n'était pas uniquement visuel, il était aussi sonore. Ceci permettra de comparer la différence des modes de contagion.

## 4.3 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

---

Nous sommes globalement satisfaits des vidéos que nous avons acquises. Nous avons observé une bonne dynamique, les participants étaient motivés, curieux et **réactifs**.

### Première vague d'expérience (décembre 2017)

Les deux configurations choisies nous donnent des résultats intéressants. Dans la configuration circulaire, on remarque que l'ensemble des piétons est **alerté dès la déclaration du danger** car ils sont tous à proximité visuelle du danger. L'évacuation est alors plus rapide que dans la configuration linéaire, de plus celle-ci s'effectue en deux dimensions. Dans la configuration linéaire, on peut observer **la propagation de l'information**. En effet, certains piétons sont éloignés du danger et ne le voient pas directement, ils doivent alors recevoir l'information de proche en proche avant de fuir selon une seule direction ; ce phénomène est détaillé dans la figure suivante (figure 6).

Cette expérience réalisée avec 35 participants nous permet de quantifier davantage le phénomène. La zone bleue sur la figure 6 correspond aux participants qui ont reçu l'information et la localisation du danger. La zone rouge correspond aux participants qui ont pris conscience du danger et qui ont déclenché leur action de fuite. On remarque qu'à l'intérieur de la zone rouge, **la densité s'élève à cause de la pression exercée par les piétons ayant déjà entamé leur fuite**.



FIGURE 5 – Fuite d’une foule face à un danger ponctuel, en configuration circulaire (à gauche) et linéaire (à droite) ; T : temps en secondes

Un pointage de chaque piéton nous permettra d’obtenir un champ de vitesse ainsi qu’une densité précise. Nous pourrons alors exploiter les données pour calibrer notre modèle.

### Deuxième vague d’expérience (mars 2018)

Lors de cette seconde séquence d’expériences, **nous disposons de davantage de participants**. La géométrie adoptée était celle appelée circulaire précédemment. Malgré le nombre plus élevé de participants, nous avons remarqué une motivation moindre de ceux-ci par rapport aux expériences précédentes. Les temps de réaction étaient plus élevés et certains participants ne jouaient pas le jeu. Une des trois expériences a été réalisée avec un danger visuel, et les deux autres avec un danger à la fois visuel et sonore. Nous avons remarqué que **la durée nécessaire pour évacuer la totalité des participants est significativement diminuée lorsque les participants sont avertis par le signal sonore**. Ils sont en effet conscients dès le premier instant de l’existence du danger même s’ils ne connaissent pas forcément sa position. Nous sommes satisfaits du changement de prise de vue réalisé puisque l’image est peu déformée. Le traitement des données sera ainsi simplifié.

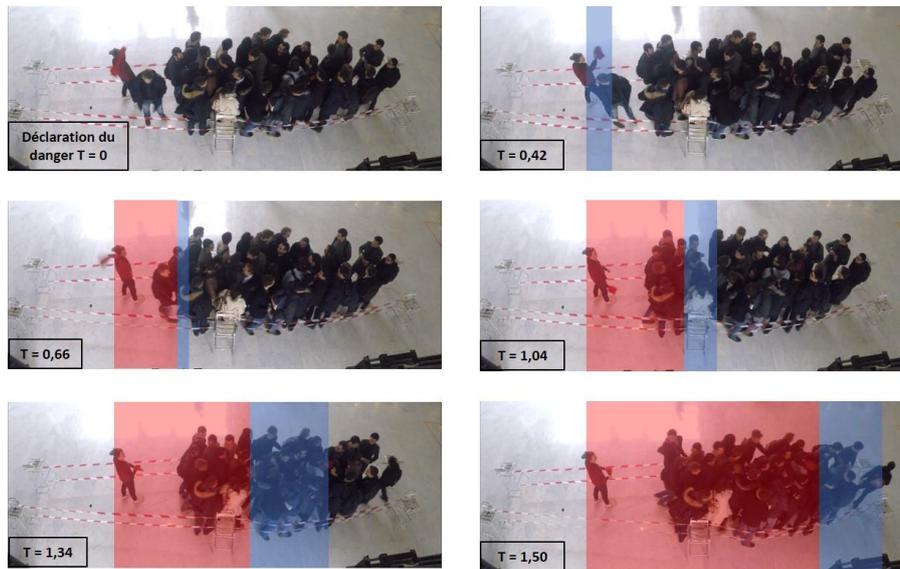


FIGURE 6 – Propagation de l'information (en bleu) suivi de la réaction de la foule (en rouge) lors d'une expérience en configuration linéaire;  $T$  : temps en secondes

## 5 PRODUCTIONS FINALES

### 5.1 ANALYSE DES EXPÉRIENCES

À la suite de nos deux séries d'expérience réalisées en décembre et en mars, il nous a fallu traiter les données de manière efficace afin de faire ressortir les paramètres essentiels. Comme annoncé ci-dessus, nous avons opté pour la captation avec caméra GoPro™ suivi d'un **pointage à la main**.

#### 1ère étape : préparer le pointage

La première opération à réaliser est de **réduire le nombre d'images par seconde à 15** pour réduire le temps de pointage. Ce nombre n'est pas limitant pour la qualité des données étant donné que la vitesse des piétons est de l'ordre de 1m/s et que la précision de pointage est de l'ordre de 10cm. Le second traitement à effectuer est d'**enlever l'effet fish eye** caractéristique de la captation via GoPro™. En effet, cette caméra a un angle de champ très grand de  $127^\circ$ , ainsi les lignes droites passant loin du centre sont fortement courbées. Il suffit pour corriger cette distorsion d'appliquer une transformation de type "barrel distorsion", définie par H. Dersch et de la forme  $r' = r(A.r^3 + B.r^2 + C.r)$  où  $r$  est la distance en pixel par rapport au centre de l'image,  $A$ ,  $B$  et  $C$  sont des paramètres dépendant de la lentille et  $r'$  la distance en pixel par rapport au centre de l'image corrigée.



*Avant la correction : les lignes droites sont légèrement courbées*



*Après la correction : les lignes sont de nouveau droites*

FIGURE 7 – Correction de l'effet fish eye

### 2ème étape : pointage

Une fois ces deux modifications réalisées, le travail de **pointage** a pu commencer. Nous avons utilisé pour cela le logiciel pymecavideo 6.1 qui est simple d'utilisation et gratuit. Chaque vidéo contient une cinquantaine de personnes et une centaine d'image. Avec les 9 vidéos exploitables, **cela fait donc un total d'environ 50 000 points**. En ordre de grandeur, cela représente une vingtaine d'heures de travail, et le traitement a donc équitablement été réparti. Plusieurs précautions sont à prendre pour éviter de pointer deux fois le même piéton et d'en oublier, ce qui est loin d'être évident car ces derniers ne sont pas bien visibles sur la première image. De plus, une grande partie des piétons sortent de la vidéo avant la fin, et le tableau des positions est donc partiel. Un protocole de pointage a ainsi été rédigé pour unifier les pratiques (voir l'annexe A.3). Malgré ces précautions, la tâche n'est pas aisée, et l'on comprend alors pourquoi des solutions automatisées, quoique très avancées, ne donnent pas de si bons résultats.

### 3ème étape : corrections après pointage

Une fois les pointages réalisés et exportés sous format Excel<sup>TM</sup>, deux problèmes sont à cor-

riger. Le premier consiste à **supprimer le mouvement de la caméra**. Pour cela, un point fixe (carreau au sol, pilier...) a été également pointé sur chaque vidéo, et c'est le déplacement relatif de ce point fixe sur le pointage qui a été retranché à tous les autres points. Le second problème est bien plus complexe à traiter. En effet, pour les calculs de positions, de vitesses, et de toutes les autres grandeurs associées, **il faut que les coordonnées des piétons soient celles dans le plan de déplacement. Avec la perspective, cela n'est pas le cas sur le pointage brut**. Sur les conseils de notre tuteur Alexandre Nicolas, nous avons opté pour une solution simple et efficace. Elle consiste à pointer au préalable un échantillon, c'est-à-dire un quadrillage dont les distances au sol sont connues. Le pointage de la vidéo donne ainsi les coordonnées  $(X_{vidéo}, Y_{vidéo})$  pour tous les nœuds du quadrillage, différentes des coordonnées réelles  $(X_{réel}, Y_{réel})$ . Reste alors à trouver un polynôme de degré trois (choix arbitraire pour obtenir une précision suffisante) en les variables  $X_{vidéo}$  et  $Y_{vidéo}$  qui donne  $X_{réel}$  et un autre qui donne  $Y_{réel}$ . Cela fait deux fois 10 coefficients à déterminer.

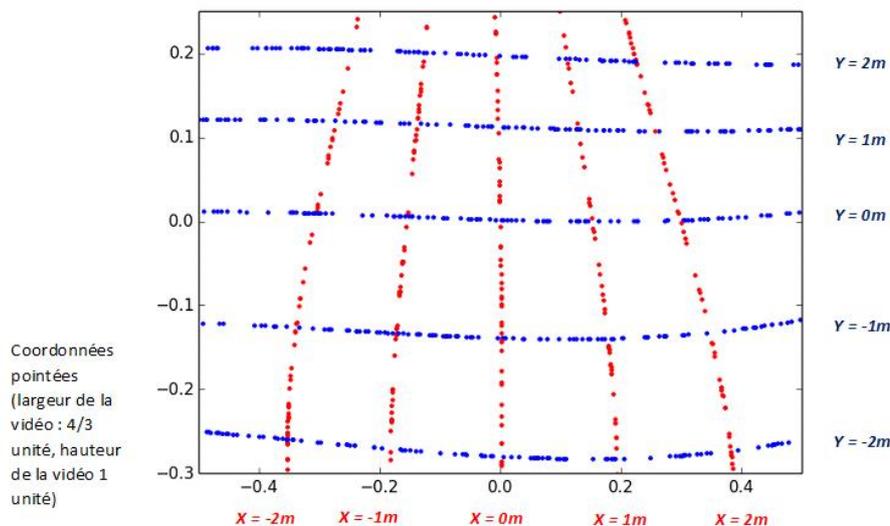


FIGURE 8 – Correspondance entre les positions des têtes sur la vidéo et celles des pieds dans la réalité

**La détermination des coefficients de ces polynômes** (propres à chaque angle de vue) s'est faite grâce au module `scipy.optimize` de Python. En effet, il suffit de minimiser la fonction qui au vecteur des coefficients du polynôme associe la somme des écarts quadratiques entre les  $X_{réel}$  et l'image de  $(X_{vidéo}, Y_{vidéo})$  par le polynôme utilisant ces coefficients. De même pour  $Y_{réel}$ . Une fois ces 20 coefficients trouvés, il ne reste plus qu'à appliquer les deux polynômes sur les coordonnées des pointages.

#### 4ème étape : exportation et analyse sous Python

Une fois tout ce travail effectué, il ne reste plus qu'à analyser les données. Tout d'abord, les données ainsi calculées sont exportées en fichier texte, le plus brut possible pour être lu par un script Python. **Les positions des piétons sont stockées sous forme de tableau dans la mémoire Python.**

À partir de ces positions, nous avons calculé :

- **Les vitesses des piétons.** Il s'agit simplement de faire la différence entre deux pas de temps et de diviser par l'intervalle de temps  $\delta t = 1/15$  s :  $v(t) = \frac{x(t) - x(t - \delta t)}{\delta t}$
- **Le champ de densité des piétons.** Pour cela, nous avons convolé une fonction d'indicatrice des piétons (chaque piéton est considéré comme un disque de rayon 30cm) et une gaussienne à deux dimensions de distance caractéristique 1.8m. Cette distance a été choisie comme une valeur approchée de la distance moyenne entre piétons sur l'ensemble des vidéos.
- **Le champ de vitesse des piétons.** Il s'agit de la même méthode que pour le calcul du champ de densité, mais en multipliant chaque plateau de l'indicatrice par la vitesse du piéton au centre.
- **La pression cinétique.** Par analogie avec la physique des gaz, nous avons multiplié les champs de variance de vitesse locale et de densité.
- **La répartition des vitesses** (histogramme)
- **L'évolution du rayon moyen.** A chaque instant  $t$ , le rayon moyen est la moyenne des distances des piétons au danger.
- **L'histogramme des temps d'évacuation.** Le temps d'évacuation est défini comme le temps nécessaire pour dépasser le cercle centré sur le danger et de rayon égal à la moyenne des distances de tous les piétons sur l'ensemble des temps.
- **Le temps de réponse.** Il est défini comme le temps pour atteindre les 70% de l'augmentation de la variance des vitesses initiales à la variance finale. Cette variance étant relativement bruitée, elle a été préalablement lissée par un filtre passe-bas de type moyenne glissante.
- **Le bruit de déplacement.** Il est défini comme l'écart moyen entre la vitesse d'un piéton au cours du temps et sa vitesse lissée par moyenne glissante.

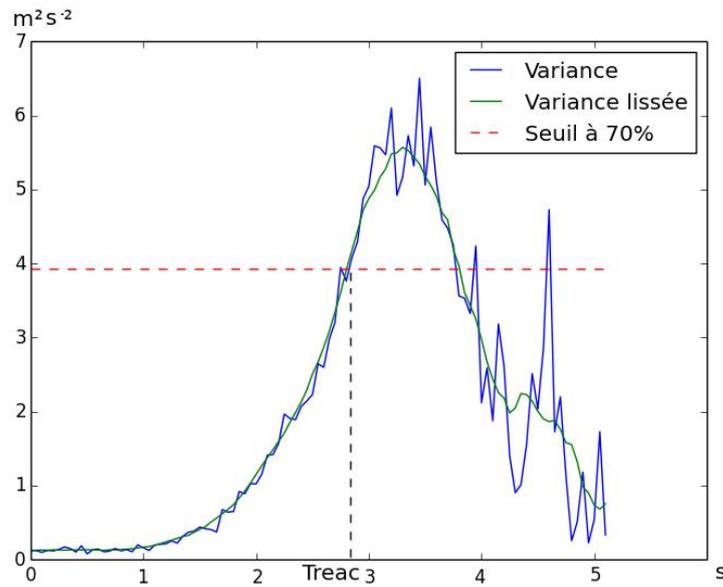


FIGURE 9 – Détermination du temps de réponse à 70% avec la variance des vitesses

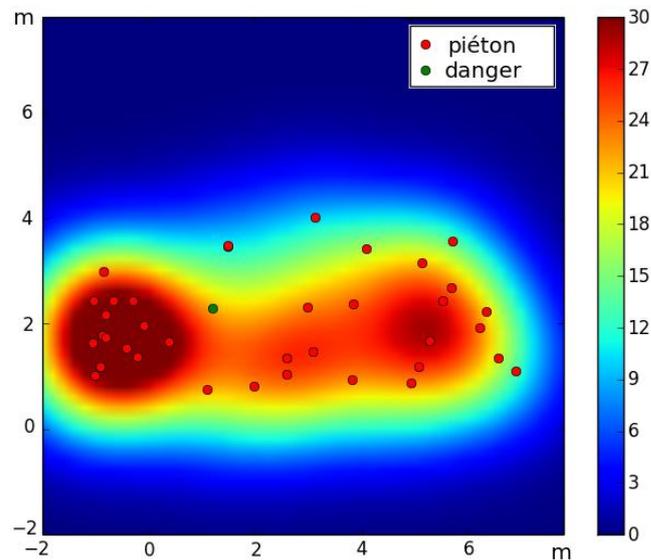


FIGURE 10 – Densité des piétons en  $m^{-2}$

## 5.2 CONCEPTION DU MODÈLE

La réalisation principale de notre PSC, qui est arrivée dans le dernier mois de travail, a été l'implémentation en C++ de notre propre modèle et son étalonnage à partir des

**expériences réalisées.** Nous décrivons dans cette partie l'élaboration sur le papier de ce modèle.

Forts de nos connaissances de modèles déjà existants (voir partie 3.1) et des enseignements de notre automate cellulaire (voir partie 3.2), nous avons voulu élaborer **notre propre modèle**, répondant aux contraintes suivantes :

- se fonder sur le **comportement individuel** des piétons
- prendre en compte **divers niveaux de conscience du danger** pour ceux-ci, comme nous l'avons observé dans nos expériences
- utiliser un **petit nombre de paramètres variables** pour faciliter la calibration de l'algorithme à l'aide des expériences
- être **exécutable rapidement** par un ordinateur

Nous avons choisi d'ignorer toute différence entre les piétons pour limiter le nombre de paramètres. Ainsi, **chaque piéton suit les mêmes règles mais se comporte différemment en fonction de son état de conscience.** Il en existe trois : 1) conscient d'aucun danger (état NON), 2) conscient de l'existence d'un danger mais pas de sa position (FUIR), 3) conscient du danger et de sa position exacte (SAIT). Chaque piéton dispose d'une zone de conscience représentée en figure 11.

On considère qu'un piéton a conscience d'un champ de  $120^\circ$  devant lui. En effet, il est admis que pour un adulte immobile, le champ de vision vaut environ  $180^\circ$  mais lors d'un déplacement, la partie du champ dont il a conscience diminue (cf [27]), d'où la valeur de  $120^\circ$ .

Pour éviter de caractériser les éléments qu'un piéton peut voir ou qui lui sont cachés, nous avons choisi qu'il verrait tout dans un rayon  $R_2$  et rien au-delà. Cela traduit relativement bien la réalité dans une foule dense.

Le piéton est également conscient de ce qui se passe dans son entourage immédiat (bousculade, bruits, ...). Sa zone de conscience s'étend donc à tout ce qui est à une distance  $R_1$  de lui (rayon de « contact »).

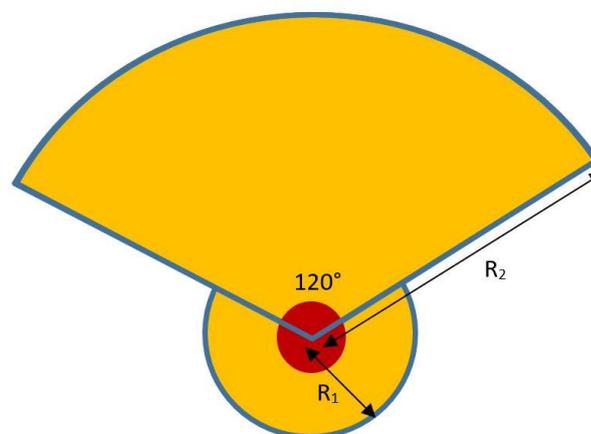


FIGURE 11 – En orange : zone de conscience du piéton représenté en rouge

À chaque tour, chaque piéton choisit sa direction souhaitée de déplacement pour le tour suivant. Dans l'état 1), il garde la direction souhaitée du tour précédent avec une vitesse  $v_{\text{lente}}$ . Dans l'état 2), il imite avec un certain retard (temps de réaction) la moyenne des vitesses des piétons dans sa zone de conscience, à la vitesse  $v_{\text{rapide}}$ . Dans l'état 3), sa direction souhaitée fuit de manière radiale le danger, avec la vitesse  $v_{\text{rapide}}$ . **Puis, on ajoute à toutes ces vitesses souhaitées un vecteur vitesse aléatoire**, de norme tirée uniformément entre 0 et  $v_{\text{aléatoire}}$  et avec une direction tirée uniformément sur l'ensemble des directions possibles. Celle-ci permet d'éviter des situations de blocage, donne aux piétons non conscients du danger la possibilité de progressivement changer de direction de déplacement et rend mieux compte de la réalité. Enfin, une fois ces vitesses obtenues, on déplace les piétons. Si des piétons se gênent mutuellement dans leur déplacement, on réduit l'amplitude de leur déplacement pour éviter toute interpénétration.

Les grandeurs à étalonner sont donc les vitesses  $v_{\text{lente}}$ ,  $v_{\text{rapide}}$ ,  $v_{\text{aléatoire}}$  et les rayons R1 et R2.

## 5.3 IMPLÉMENTATION

Le modèle, tel que présenté au paragraphe précédent, a été implémenté sur ordinateur, de manière à pouvoir faire des simulations numériques. Nous avons choisi le C++, qui présente l'avantage d'être nettement plus rapide à l'exécution que le Java (employé pour l'automate cellulaire) et est un langage intransigeant, ce qui réduit sensiblement les risques d'erreurs de programmation. L'exécutable C++ lit les paramètres de la simulation dans un fichier de configuration, fait tourner le modèle, puis **génère un fichier contenant la position de tous les agents ainsi que leur état de conscience à chaque pas de temps**.

Deux scripts Python permettent ensuite - au prix d'une attente un peu plus longue que s'ils s'agissait de C++, mais bien plus simplement - ou bien d'afficher les résultats et de voir le déplacement des agents, ou bien de **calculer plusieurs grandeurs utiles à l'étalonnage du modèle** (cet aspect sera développé à la partie suivante). Par ailleurs, ces scripts sont pratiquement identiques à ceux employés pour afficher le résultat du pointage des expériences.

Il ne s'agit pas ici de donner le détail du fonctionnement du programme, il suffit de savoir qu'il implémente point par point le modèle décrit précédemment. Néanmoins, d'un point de vue pratique, son fonctionnement repose sur l'utilisation de **RVO2**<sup>1</sup>, bibliothèque C++ d'« évitement de collision réciproque pour simulation multi-agents en temps réel » qui nous a été conseillée par notre tuteur et est employée par plusieurs équipes de chercheurs, principalement en simulation de foules.

RVO2 est la base du programme, c'est elle qui gère les déplacements des piétons (les agents)

---

1. <http://gamma.cs.unc.edu/RVO2/>

et empêche leur collision ou leur interpénétration. À chaque pas de temps, le programme attribue à chaque agent une  $v_{\text{cible}}$  (suivant les règles du modèle : vitesse de norme  $v_{\text{lente}}$  ou  $v_{\text{rapide}}$  à laquelle est ajoutée une vitesse aléatoire de norme maximale  $v_{\text{aléatoire}}$ ) puis RVO2 fixe la *vitesse réelle* des agents.

Si le déplacement correspondant à la *vitesse cible* ne mène pas à une collision avec un autre agent, la *vitesse réelle* est égale à la *vitesse cible*.

Dans le cas contraire, RVO2 adapte la *vitesse cible* en une *vitesse réelle* de même direction, mais de norme plus faible afin d'éviter la collision. Cette vitesse est choisie la plus proche possible de la *vitesse cible*.

Enfin seulement, RVO2 déplace les agents en respectant leur *vitesse réelle*. **Contrairement à l'automate cellulaire, la position des piétons est libre ici de varier de façon continue.**

Le reste du modèle (propagation de l'information du danger, zone de conscience et état de conscience de chaque piéton, choix de la vitesse cible, génération de l'emplacement initial de chaque piéton, etc.) est géré directement par notre code C++.

Chaque simulation débute par la génération des piétons dont les positions sont distribuées selon une loi aléatoire (normale ou uniforme) spécifiée par l'utilisateur. Puis le programme donne des vitesses cible nulles à chaque piéton et effectue des pas de simulation RVO2 jusqu'à ce que les agents cessent de bouger. Cela permet d'atteindre un état initial où les piétons ne s'interpénètrent pas, ce que la génération aléatoire ne peut garantir à elle seule. Ensuite seulement la simulation peut démarrer avec les vitesses prévues par le modèle. Enfin, elle s'arrête lorsque tous les agents ont dépassé une distance fixée au danger. Le programme, malgré un temps quadratique en le nombre de piétons, permet de simuler en quelques secondes la fuite de plusieurs centaines de piétons. **Nous avons pu simuler jusqu'à 5000 piétons en quelques minutes**, ce qui est tout à fait raisonnable. Des exemples de simulations seront donnés et commentés dans une prochaine partie.

Le comportement du modèle étant satisfaisant d'un point de vue qualitatif, notre prochaine préoccupation a été de **l'étalonner** à partir de nos données expérimentales.

## 5.4 ÉTALONNAGE DU MODÈLE

Une fois la simulation implémentée, il nous a fallu vérifier sa pertinence en la **confrontant à la réalité**. Nous avons donc à notre disposition les données des expériences et le code Python qui permet d'en faire l'analyse comme décrit en section 5.1. L'étalonnage du modèle commence par le choix des grandeurs à calibrer. Étant donné qu'il est bien plus simple de calibrer une grandeur scalaire plutôt qu'un champ de vecteur, il nous a fallu **déterminer des grandeurs scalaires caractéristiques du mouvement de foule étudié**.

## ● GRANDEURS D'ÉTALONNAGE

**1<sup>re</sup> grandeur : temps de réponse** La première grandeur essentielle est le temps de réponse, c'est-à-dire le temps de réaction de la foule. Nous l'avons défini comme étant la durée entre la déclaration du danger et l'instant où la variance des vitesses atteint 70% entre la variance initiale et maximale. En effet, **cette variance traduit la panique des piétons** puisqu'elle est d'autant plus grande que les vecteurs vitesses pointent dans des directions aléatoires et que leurs normes sont grandes. Pour les expériences de décembre, ce temps de réponse est de  $2,0 \pm 0,2$ s alors qu'il est de  $3,3 \pm 0,3$ s pour les expériences de mars. En effet, notre définition du temps de réponse rend cette observable dépendante du nombre de piétons. C'est pour cela qu'il est plus élevé pour les expériences comprenant plus de participants.

**2<sup>e</sup> grandeur : densité, vitesses et bruit** Certaines grandeurs sont particulièrement simples à calibrer dans le sens où ce sont des paramètres d'entrées de la simulation. Le premier correspond à la **densité initiale**, c'est-à-dire au nombre de piétons divisé par la surface délimitée par le plus petit rectangle qui contient les positions initiales.

Il y a également les **vitesse**s de mouvement lent (piétons non conscients du danger) et de mouvement rapide (piétons conscients du danger). Pour déterminer ces vitesses dans les expériences, une moyenne des normes des vitesses a été calculée à chaque instant, puis cette évolution a été lissée par un filtre passe-bas de type moyenne glissante. La vitesse lente a alors été choisie comme celle de l'instant 0 et la vitesse rapide comme celle maximale. Notons que contrairement à la simulation la vitesse maximale n'est pas celle finale car les volontaires ralentissent une fois qu'ils pensent être assez éloignés du danger.

Vient finalement le **bruit**, qui correspond à la **vitesse aléatoire** de chaque piéton à tout instant. Pour déterminer cette grandeur dans les expériences, nous avons simplement calculée la différence en valeur absolue entre la vitesse et la vitesse lissée (cf ci-dessus). Ensuite nous avons effectué la moyenne pour obtenir ladite grandeur scalaire.

**3<sup>e</sup> grandeur : moyenne et écart type de la gaussienne des temps d'évacuation** L'expérience de fuite de danger peut également être vue comme l'évacuation de cette **zone dangereuse**. Il faut donc définir la zone où les piétons sont considérés comme évacués. Cette zone est naturellement **l'espace au-delà d'un cercle centré sur le danger**. Reste alors à déterminer le rayon de ce cercle. L'idéal serait de le prendre comme étant la moyenne des distances des piétons par rapport au danger au dernier instant. Mais cela n'est pas possible car d'une part presque la moitié ne serait jamais dans la zone sûre et d'autre part certains piétons disparaissent de la zone filmée avant cet instant final.

Pour résoudre ces deux problèmes nous avons donc choisi de prendre le rayon égal à la moyenne au cours du temps des distances moyennes des piétons par rapport au danger. Une fois la zone d'évacuation définie, il est alors simple de définir le temps d'évacuation : l'instant à partir duquel le piéton entre (et reste) dans cette zone. On associe à chaque piéton un temps d'évacuation et on peut alors déterminer la moyenne et l'écart type pour chaque expérience.

Une fois toutes ces grandeurs définies et calculées, l'étalonnage à proprement parler s'est

déroulé en deux temps. Tout d'abord nous avons déterminé **quel paramètre du modèle a la plus grande influence sur chaque grandeur de sortie**. Puis nous avons cherché **les valeurs de ces paramètres** qui, tout en restant physiquement réalistes, permettaient d'approcher au mieux ces mêmes grandeurs mesurées sur les résultats de nos expériences. Cette deuxième étape a été moins efficace que nous l'espérions tout d'abord, mais elle nous a permis de mieux comprendre le comportement du modèle et ses approximations.

Désormais, chacune des mesures présentées (sauf celles relatives aux expériences) est une moyenne sur 20 simulations. Nous nous sommes en effet rendus compte de la grande **variabilité** des grandeurs qui nous intéressent d'une simulation à l'autre, et un traitement statistique s'est avéré nécessaire afin d'avoir des valeurs stables. Le modèle est très sensible à toutes les variations aléatoires introduites : distribution initiale aléatoire des piétons dans l'espace et ajout d'une vitesse aléatoire, même faible. Ceci traduit la grande complexité des phénomènes de foules, même à travers notre modèle simplifié, et explique en partie les difficultés rencontrées pour étalonner le modèle.

## • INFLUENCE DES PARAMÈTRES SUR LES GRANDEURS DE SORTIE

Le tableau de la Figure 12 présente **la variation relative des grandeurs de sortie en fonction d'un doublement de chaque paramètre d'entrée**. La simulation de référence a pour paramètres  $\text{nbPiétons} = 100$ , dimension zone initiale =  $5,57m \times 5,57m$ ,  $R1 = 0,6m$ ,  $R2 = 3,0m$ ,  $v_{\text{lente}} = 1,0m/s$ ,  $v_{\text{rapide}} = 3,0m/s$  et  $v_{\text{aléatoire}} = 0,1m/s$ . Les piétons sont générés selon une loi uniforme et la densité a été choisie identique à celle de nos premières expériences (29 piétons sur  $9m^2$ ). Nous avons choisi de travailler avec 100 piétons plutôt que 29 car, pour un faible nombre de piétons, la transmission de l'information dans le modèle se fait parfois mal et certains piétons ne s'aperçoivent jamais de la présence du danger, ce qui fausse le calcul des grandeurs de sortie.

En gras dans le tableau sont présentées les variations les plus significatives. Détaillons-les :

- Une augmentation de **R1** (rayon de « contact » de la zone de conscience des piétons) se traduit par une diminution du **temps de réponse**. Cet effet est dû à une propagation plus rapide de l'information : chaque piéton est attentif à plus de voisins.
- de la même manière, une augmentation de **R1** fait diminuer le **temps d'évacuation moyen**.
- enfin, lorsque **R1** augmente, **l'écart type des temps d'évacuation** des piétons diminue : les piétons fuient d'avantage en même temps. En effet, puisque l'information se propage plus vite, il y a moins de latence entre les piétons les plus proches du danger et les plus éloignés.
- Une **vitesse lente** (celle des piétons non conscients du danger) plus importante augmente les déplacements des piétons aux instants initiaux, donc leur probabilité de croiser le danger ou un piéton conscient du danger. Ainsi, cela augmente la **propagation de l'information**, d'où des effets sur le temps d'évacuation similaires à ceux d'une aug-

a) Effet de la variation des paramètres						
	Temps de réponse	Bruit	Temps moyen d'évacuation	Ecart-type temps d'évacuation	Vitesse initiale	Vitesse maximale
Contrôle	1%	5%	-6%	-10%	4%	0%
R1 × 2	<b>-20%</b>	19%	<b>-29%</b>	<b>-33%</b>	7%	1%
R2 × 2	-9%	8%	-15%	-8%	0%	0%
vLente × 2	-11%	7%	<b>-22%</b>	<b>-27%</b>	<b>26%</b>	-3%
vRapide × 2	-5%	<b>32%</b>	-16%	-15%	6%	<b>33%</b>
vAleatoire × 2	-3%	<b>10%</b>	3%	-5%	-2%	0%

b) Grandeurs de sortie des expériences						
	Temps de réponse	Bruit	Temps moyen d'évacuation	Ecart-type temps d'évacuation	Vitesse initiale	Vitesse maximale
circulaire1	1,933	0,77	2,167	0,872	1,162	3,558
circulaire2	2,2	0,759	2,141	1,153	0,695	3,765
circulaire3	1,8	0,695	1,944	1,944	0,832	2,762
Moyenne	1,977	0,74	1,084	1,323	0,896	3,362

c) Effet de l'étalonnage						
	Temps de réponse	Bruit	Temps moyen d'évacuation	Ecart-type temps d'évacuation	Vitesse initiale	Vitesse maximale
Initial	4,45	0,113	7,230	1,106	0,605	2,997
Modèle étalonné	3,26	0,237	4,484	0,783	0,594	3,877

FIGURE 12 – Tableau présentant : **a)** L'effet d'un doublement de chacun des paramètres sur toutes les grandeurs de sortie (variations relatives, exprimées en pourcents). **b)** Les grandeurs de sorties calculées pour les expériences. **c)** Les grandeurs de sorties calculées pour la simulation initiale de référence et une simulation du modèle étalonné. Les unités sont celles du système international.

mentation de R1. La vitesse lente est la vitesse cible des piétons non conscients du danger, donc de tous les piétons initialement. Il est rassurant qu'une augmentation de

cette vitesse fasse augmenter la vitesse initiale.

- Nous n’avons pas d’explication physique à l’augmentation du **bruit statistique** avec celle de la **vitesse rapide**, en revanche l’on constate bien une forte corrélation entre la **vitesse rapide** (paramètre d’entrée) et la **vitesse maximale** (grandeur de sortie).
- enfin, l’augmentation de  **$v_{\text{aléatoire}}$** , norme maximale de la vitesse aléatoire ajoutée à la vitesse cible de chaque piéton, se traduit par une augmentation du **bruit statistique**, ce qui est encore une fois rassurant.

Enfin, une simulation de contrôle, avec les mêmes paramètres que la situation de référence permet de se convaincre que le traitement statistique par paquet de 20 simulations est suffisant et permet bien d’avoir des résultats reproductibles.

## • ÉTALONNAGE PRÉCIS DES PARAMÈTRES D’ENTRÉE

Après l’obtention de ces résultats, nous avons calculé les valeurs des grandeurs de sortie pour certains résultats expérimentaux. Ces valeurs sont également présentées dans le tableau de la Figure 12). Nous n’avons employé ici que **les résultats des expériences menées dans les mêmes conditions**, afin de pouvoir faire une moyenne.

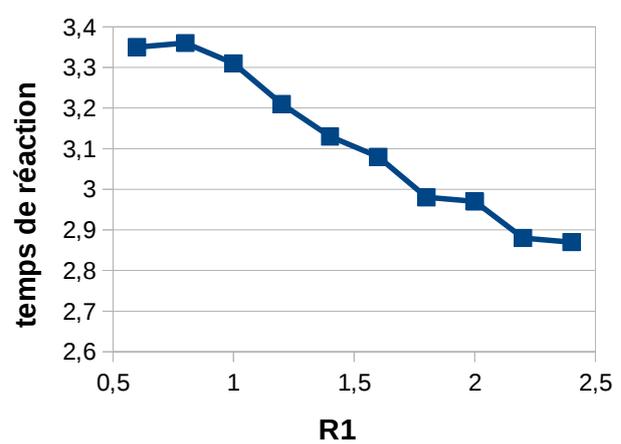
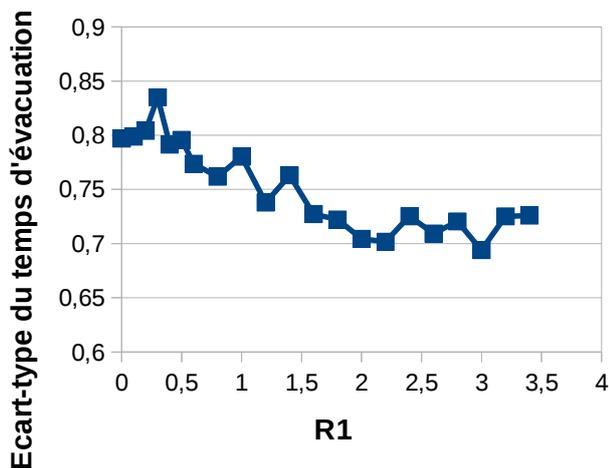
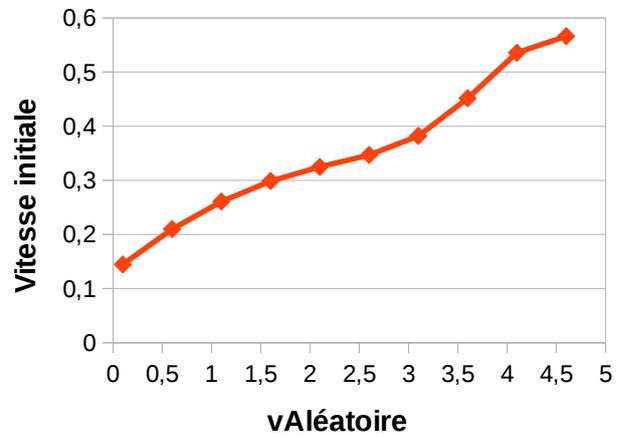
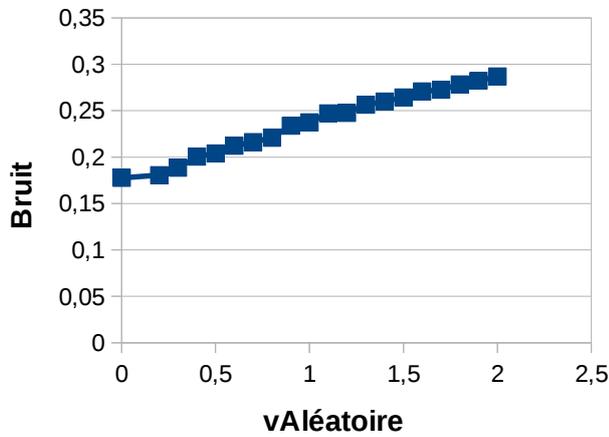
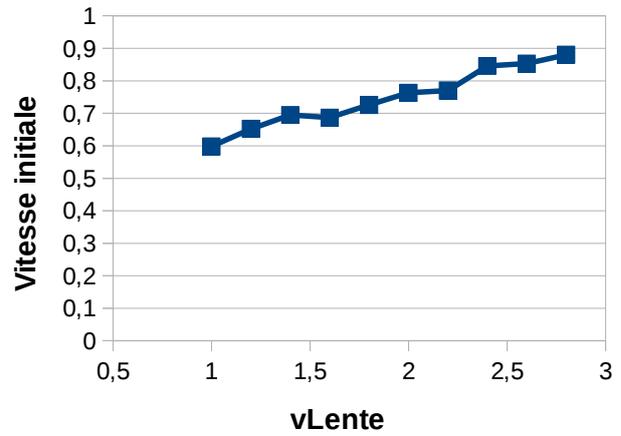
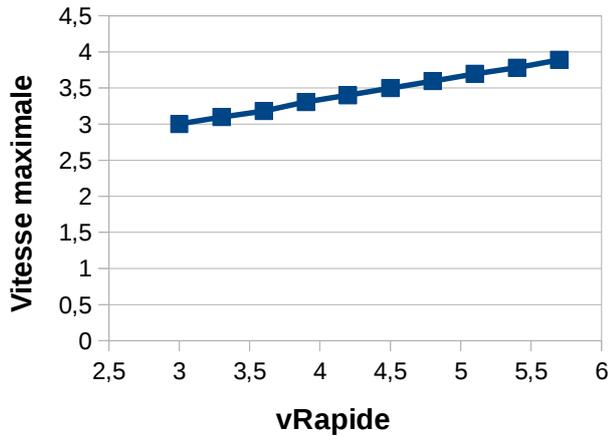
Nous avons alors **cherché les valeurs des paramètres du modèle permettant d’obtenir pour nos simulations la même valeur que la moyenne des expériences**. Pour ce faire, nous avons tracé – pour chacune des variations les plus significatives trouvées précédemment – la grandeur de sortie en fonction du paramètre d’entrée, pour des variations des paramètres raisonnables.

Ces courbes sont présentées en figure 5.4. Avant d’entrer dans le détail de chaque paramètre, il convient de noter que, pour la plupart, les variations sont quasiment affines. Cependant, le modèle est hautement non linéaire. Cette propriété traduit que le choix d’étalonner cette entrée au moyen de cette sortie est pertinent, car la seconde dépend de manière univoque de la première.

À partir de ces courbes, nous avons étalonné un à un les différents paramètres du modèle.

**Étalonnage de  $v_{\text{rapide}}$**  La relation entre  $v_{\text{rapide}}$  et la vitesse maximale est la plus linéaire. Ainsi, il a été facile de déterminer que  $v_{\text{rapide}} = 4m/s$  permet d’avoir la bonne valeur de vitesse maximale.

**Étalonnage de  $v_{\text{lente}}$**  La relation entre  $v_{\text{lente}}$  et la vitesse initiale est elle aussi linéaire. Néanmoins, pour atteindre la valeur de vitesse initiale des expériences, il aurait fallu fixer  $v_{\text{lente}} = 2,8m/s$ , ce qui est bien trop élevé pour des piétons se déplaçant naturellement dans une foule. Cette importante différence vient du fait que, dans une foule dense, des piétons réels s’évitent, se glissent les uns entre les autres (ce fut le cas lors des expériences), alors que les piétons du modèle ne le font pas. Leur forme circulaire est encombrante et lorsque quelqu’un se trouve sur leur chemin, ils sont contraints de ralentir, d’où une vitesse initiale assez faible



dans le modèle. Finalement, nous avons fixé  $v_{lente} = 0,89m/s$ , ce qui est la valeur de la vitesse initiale dans nos expériences.

**Étalonnage de  $v_{aléatoire}$**  La valeur de  $v_{aléatoire}$  influence fortement les grandeurs bruit et vitesse initiale. Néanmoins, comme pour  $v_{lente}$ , pour atteindre les valeurs expérimentales de ces

grandeurs, il faudrait une valeur de  $v_{\text{aléatoire}}$  supérieure à 5 m/s, ce qui est bien supérieur aux vitesses des piétons. Il nous a semblé que  $v_{\text{aléatoire}} = v_{\text{lente}}$  est la valeur maximum physiquement réaliste (sachant que l'espérance de la norme vitesse aléatoire résultante est  $v_{\text{aléatoire}}/2$  et que l'orientation est aléatoire). La valeur élevée du bruit dans les expériences est très probablement due à des imprécisions de pointage qui, à raison de 15 points par seconde, ont un grand impact sur les vitesses des piétons.

**Étalonnage de R1** R1 n'a de sens que s'il est supérieur à 0,6m. En effet, en deçà, les centres de deux piétons de diamètre 0,3m ne peuvent se trouver à moins de R1 l'un de l'autre. On observe d'ailleurs bien qu'en dessous de 0,6m, l'écart-type du temps d'évacuation ne dépend plus de R1 (aux variations aléatoires près). Puisque cet écart-type diminue avec R1, et qu'il était déjà inférieur aux expériences, il ne permet pas d'étalonner R1. Seul le temps de réponse le permet. Malheureusement, atteindre le temps de réponse de 2s des expériences demanderait R1 de plusieurs mètres, ce qui est absurde pour une zone « de contact » autour du piéton. Nous avons donc arbitrairement fixé  $R1 = 1\text{m}$ . Nous atteignons ici les limites de nos expériences. En effet, notre modèle cherche à rendre compte des effets de la transmission de l'information par la vue et le contact (*ie.* de proche en proche), alors que nous n'avons pas pu éliminer la transmission sonore lors de nos expériences.

**Étalonnage de R2** R2 ne semblant pas avoir grande influence sur aucune grandeur, nous avons conservé  $R2 = 3\text{m}$ . Nous pensons que sur une zone aussi petite que  $5,5 \times 5,5\text{m}^2$ , la zone de vue joue un rôle négligeable par rapport à la zone de contact. Sans doute dans une géométrie différente ce paramètre aurait une plus grande influence sur les mêmes grandeurs de sortie que R1.

Le tableau de la Figure 12 présente les variations des grandeurs de sortie entre les simulations initiales de référence et le modèle étalonné. Une comparaison avec la moyenne des expériences permet de dire que, si l'on est encore loin des valeurs expérimentales, il y a tout de même un net progrès. Cet étalonnage moins précis que nous le souhaiterions nous met devant les limites de notre modèle, mais aussi de nos expériences. **Les prédictions du modèle sont destinées à rester semi-qualitatives**, il est trop simple pour rendre compte de la variété de phénomènes mis en jeu.

Cependant, cet étalonnage nous a fait **comprendre les relations entre les paramètres du modèle et les grandeurs physiques mesurables**. Ce modèle n'a pas vocation à reproduire fidèlement les phénomènes de foule, mais à en capter les mécanismes dominants. De ce point de vue, un accord plus précis qu'un ordre de grandeur avec l'expérience est un réel succès.

## 6 BILAN

---

### 6.1 SIMULATION

---

Outre l'aspect quantitatif de l'étalonnage, les simulations faites par le modèle amènent plusieurs observations qualitatives.

- L'ONDE DE COMPRESSION

Les simulations recréent bien la vague de compression due à la panique que nous cherchions à étudier. Cependant, il s'est avéré que cette vague est un phénomène très dépendant de la densité de piétons. La figure 13 présente trois simulations où, toutes choses égales par ailleurs, nous avons fait varier la densité de piétons.

**À faible densité, il n'y a pas de vague de compression** : il y a trop peu de piétons pour qu'ils se gênent réellement les uns les autres dans leur fuite.

**À haute densité, il y a bien un engorgement** : les piétons du centre qui cherchent à fuir sont coincés par ceux des bords tant que ceux-ci ne fuient pas. Cependant, il n'y a pas de compression car la densité initiale est telle que les piétons au centre ne peuvent réellement se déplacer (notre modèle ne permet pas aux piétons de pousser leurs voisins).

**Pour la densité moyenne, enfin, on observe une certaine vague sur la deuxième image**, à gauche du danger (situé en  $(0, 0)$ ). Les piétons rouges n'ont pas pu fuir librement, ils sont massés contre des piétons verts qui viennent seulement de réagir. On note qu'il s'agit d'un phénomène local. En effet, à la droite du danger, les piétons rouges ont réussi à se glisser entre les verts. Il y a donc une réelle **dépendance envers la distribution initiale** locale de piétons.

Cette dépendance se traduit aussi si l'on fait les mêmes simulations avec une distribution initiale de piétons gaussienne (non présenté ici). Si le danger est centré par rapport à la gaussienne, on n'observe pas de phénomène de compression. En revanche, si le danger est décalé par rapport au centre de la distribution, il y a un **phénomène de compression** marqué entre le danger et ce centre.

Il semble donc que le phénomène de vague de compression est lié d'une part à la **densité** de piétons, d'autre part à la **répartition de cette densité**, via son gradient. Une étape supplémentaire sera de déterminer dans quelle gamme de densité initiale peut se développer cette vague, et comment elle dépend du gradient de densité locale, afin de pouvoir détecter les situations à risques. Une meilleure prédiction de ces phénomènes permettrait d'éviter des accidents comme lors de la vague de panique de Turin où une dizaine de personnes ont été blessées.

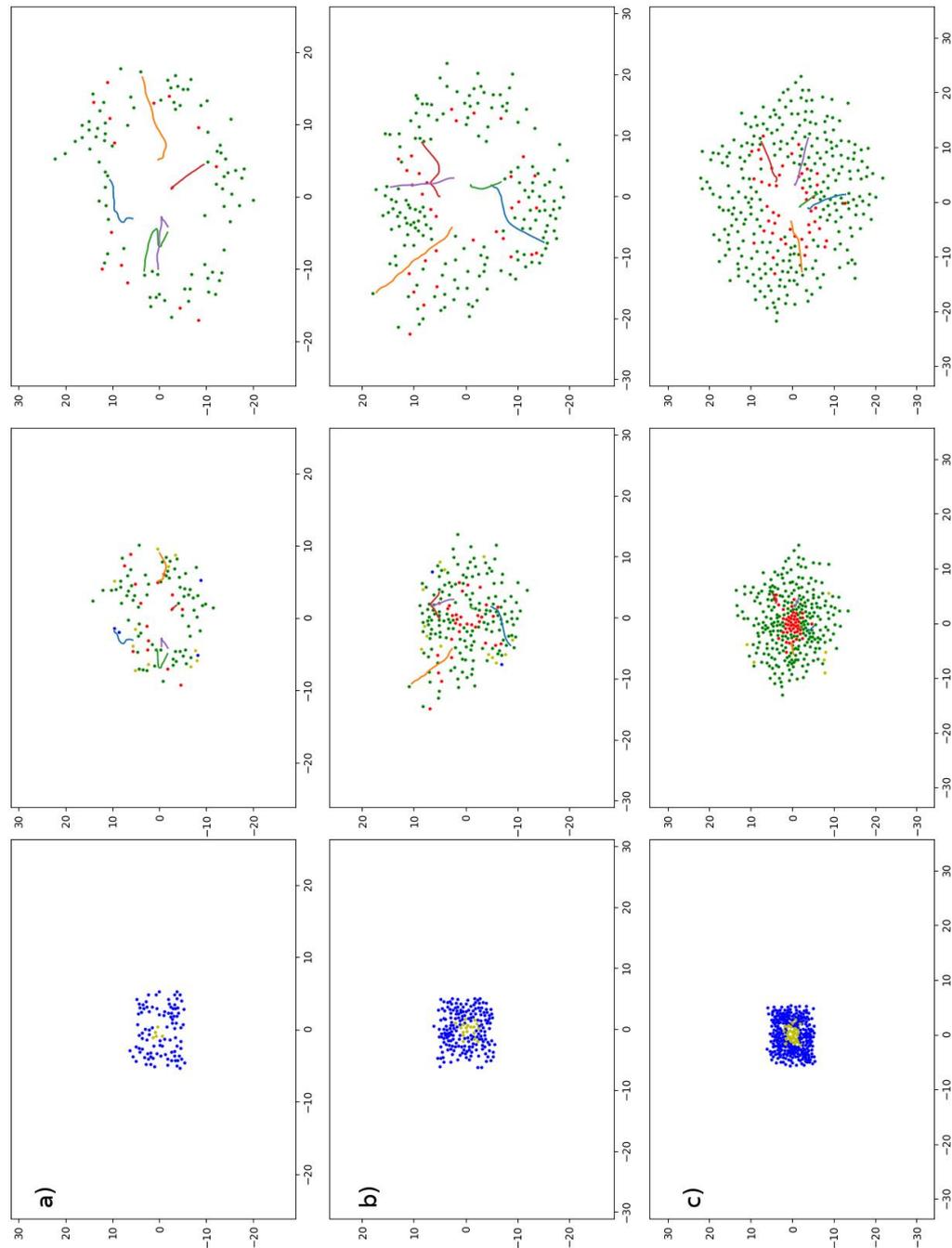


FIGURE 13 – Images de trois simulations à  $t = 0, 2s$ ,  $t = 4, 2s$  et  $t = 6, 6s$ . Les paramètres sont ceux du modèle étalonné et la distribution des piétons est uniforme sur une zone de  $10m \times 10m$ . **a)** 100 piétons, **b)** 200 piétons, **c)** 322 piétons (densité de l'étalonnage). En *bleu* : piétons non conscients du danger, en *jaune* : piétons en train de réagir, en *rouge* : piétons ayant vu le danger, en *vert* : piétons conscients du danger mais ignorant sa position. Les trajectoires de cinq piétons sont tracées à titre d'illustration.

Un phénomène qui est moins intuitif, mais que l'on observe sur la simulation à partir de quelques centaines de piétons, est **l'apparition de groupes de piétons fuyant ensemble** (voir figure 14). Rappelons que les piétons ayant vu le danger sont dans un état de conscience SAIT, et qu'un piéton non conscient passe dans l'état intermédiaire FUIR dès qu'il a dans son entourage un piéton dans l'état SAIT ou bien dans l'état FUIR. Il suffit donc d'un piéton ayant conscience du danger pour lancer un mouvement de panique, et même si ce piéton n'a pas vu le danger, d'où l'apparition de groupes de piétons fuyant le danger sans que personne dedans ne sache où il est (un groupe de piétons verts sans piéton rouge). Le mouvement de ces groupes est auto-entretenu, les piétons se suivent les uns les autres et conservent peu ou prou leur direction initiale.

Une meilleure compréhension des comportements de tels groupes pourrait permettre de **mieux contrôler les mouvements de panique dans les foules**. On peut imaginer qu'ajouter certains obstacles permettrait d'influencer le mouvement de suffisamment de personnes pour canaliser les déplacements du groupe entier.

Nos expériences ne nous permettent pas de déterminer dans quelles conditions ces groupes peuvent apparaître, mais ils ne sont pas sans rappeler les modèles « leader / followers » que l'on trouve dans la littérature (cf [10]).

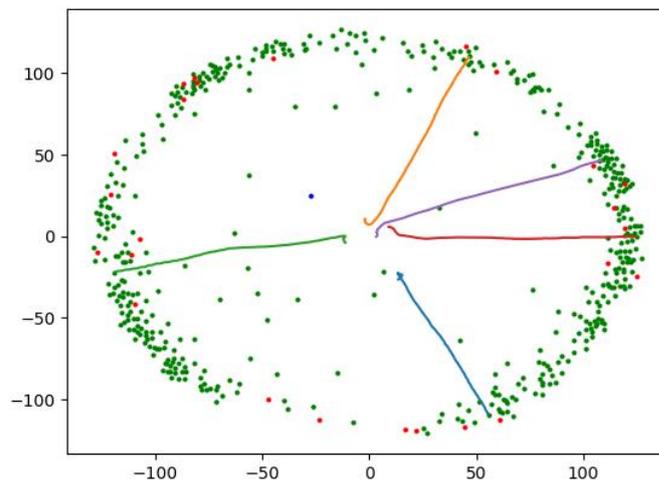


FIGURE 14 – Illustration de la formation de groupes. Simulation de 500 piétons à  $t = 28s$ . On note la présence de groupes « guidés » par des piétons rouges, mais aussi de groupes exclusivement verts.

## 6.2 COMPRÉHENSION DU PHÉNOMÈNE

---

Le phénomène de mouvement de foule est physiquement complexe à étudier. Que ce soit par la complexité du piéton en tant que tel ou par les interactions en présence du danger, les choix de modélisation ont amené à mieux comprendre le phénomène, même si certaines limites ont été observées.

### • LE SYSTÈME PIÉTON

Nous avons essayé de **le modéliser en prenant le minimum de paramètres** pour le décrire. En effet, l'idéal pour la description d'un système physique est de le modéliser avec des variables mutuellement indépendantes, chacune exprimant un aspect du système.

Pour décrire la rationalité du piéton dans la situation de danger, nous avons pris en compte **l'augmentation de sa vitesse** ainsi que **la direction radiale de la fuite du danger**. Naturellement, le piéton n'est pas omniscient et c'est pourquoi nous avons considéré les trois niveaux de conscience. Le fait qu'un piéton court dans la même direction que ses voisins attestent de sa rationalité. Cela est effectivement visible sur les expériences, via l'étalement quasi circulaire de la foule.

Cependant, un humain est également doté de libre-arbitre, et d'une certaine façon d'irrationalité. Cet aspect du système est bien plus complexe à modéliser, et comme souvent en physique, cela s'est fait par **l'introduction d'aléa**. Seuls les comportements moyens de l'aléa sont alors à calibrer.

Comme attendu, les analyses des expériences montrent bien que chaque personne cherche à s'éloigner le plus rapidement possible du danger. Les mouvements ne sont pas non plus parfaitement rectilignes car le **bruit** défini en section 5.1 n'est pas nul. Enfin, le système piéton ne change pas d'état instantanément mais après un certain **temps de réaction** de l'ordre de 1s.

### • LES INTERACTIONS

La connaissance du système isolé ne permet pas ici de déterminer la trajectoire globale en réaction au danger. Pour cela il faut comprendre comment les piétons interagissent entre eux et avec le danger. Comme dit précédemment, chaque personne cherche à s'éloigner le plus rapidement possible du danger, peu de temps après en avoir pris conscience, et aux aléas près. Les interactions entre piétons sont un peu plus complexes. **Deux termes principaux apparaissent : un terme d'attraction (coopération) et un terme de répulsion (compétition).**

Pour ce qui est de la coopération, il s'agit du **principe du berger et des moutons**. Si un des piétons a un mouvement suffisamment crédible, les autres le suivent. Dans le cas présent,

cette crédibilité s'exprime par le comportement visible de panique. C'est ce qui a été traduit dans la simulation par l'état de conscience intermédiaire : le piéton est au courant de la présence du danger mais ne sait pas où il est. Il va donc s'aligner sur les trajectoires de son entourage.

Pour le terme répulsif, il s'agit premièrement du terme de **répulsion par rapport au danger**. Cela peut être vu comme l'interaction avec un potentiel stationnaire qui s'applique sur tout l'espace. Mais il y a également un terme de répulsion stérique entre chaque piéton. D'une part, cela est le modèle simple des sphères dures : les piétons ne peuvent pas s'interpénétrer. D'autre part, il s'agit du terme de **zone proche privée** : chaque piéton gardera une distance minimale avec les autres légèrement plus grande que la somme des deux rayons.

C'est cette association des deux termes attractif et répulsif qui rend le système si complexe. Le potentiel induit par le danger est suffisamment fort pour donner la tendance globale, mais les fluctuations par rapport à cette tendance sont dues au fait que **les termes d'attraction et de répulsion entre piétons fuyant sont du même ordre**. Malheureusement, les expériences ne comportent pas suffisamment de volontaires pour voir des structures apparaître. Le traitement permet cependant de voir un phénomène intéressant, qui est un premier pas vers une vague de propagation. Lorsque nous avons visualisé **la pression cinétique** (voir figure 15), il s'avère qu'elle augmente brutalement une fois le temps de réponse écoulé après la déclaration du danger. Elle n'est cependant pas uniforme, mais localisée sur le bord extérieur de la foule. En effet c'est là où la variance des vitesses est la plus élevée car les piétons ont le plus de libertés. Au sein de la foule, a contrario, les piétons subissent un mouvement quasi-imposé d'où la plus faible pression cinétique.

Un phénomène qui est moins intuitif mais que l'on observe sur la simulation pour un plus grand nombre de piétons (à partir de la centaine) est **l'apparition de structures auto-entretenues**, à savoir les groupes de piétons fuyant ensemble comme décrit dans la section 6.1. Il s'agit donc ici d'une véritable balance entre termes attractif et répulsif de même ordre de grandeur. Il est important de noter que l'interaction avec le danger ne se fait qu'une fois la prise de conscience effectuée. Contrairement à ce qui a été modélisé, **le facteur sonore joue un rôle non négligeable** en réduisant considérablement le temps de réponse. Cette interaction est plus subtile, c'est pourquoi nous avons décidé de ne pas la prendre en compte dans la simulation.

## 6.3 LIMITES

---

La principale critique que l'on peut adresser à notre modèle est le **manque de données** qui ont permis de l'étalonner. Si nous avions eu plus de temps pour faire les démarches de financement et de recrutement des participants, nous aurions pu essayer de monter des expériences plus longues avec plus de piétons. Néanmoins nous nous félicitons d'être parvenus à réaliser quelques expériences et à les exploiter malgré tout.

Pour poursuivre nos travaux et affiner nos résultats, voici quelques pistes que nous aurions

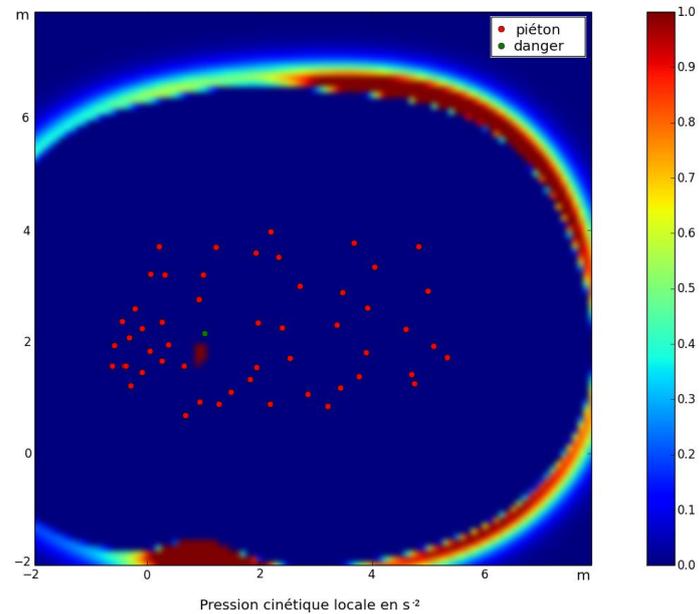


FIGURE 15 – Visualisation de la pression cinétique lors d’une expérience

pu explorer si nous avons eu plus de temps :

- faire varier les paramètres relatifs à la **disposition initiale** (densité, répartition des piétons, présence d’obstacles, etc.) pour observer éventuellement des évolutions de comportement ;
- tenir compte des **mécaniques de groupe** : la présence de groupes influence la réaction individuelle des piétons qui peuvent privilégier le fait de rester avec les autres membres de leurs groupes à leur sécurité personnelle ;
- modifier le **type de danger** : nous nous sommes intéressés à un danger ponctuel, unique et fixe, qui rend compte de certaines situations de la réalité (objet fixe qui s’enflamme, explosion, etc.) ; il serait également intéressant de faire varier le nombre de dangers, leur position au cours du temps, etc. pour obtenir un modèle plus complet.

## 7

# CONCLUSION

---

Ce PSC a été pour nous l'occasion de mener un projet de recherche à plusieurs sur un sujet qui nous était étranger. La thématique des mouvements de foule est vaste et difficile à traiter dans son intégralité.

Cela nous a conduits à explorer des impasses et à écarter des opportunités, mais nous sommes parvenus à proposer un modèle pour la réaction d'une foule dense face à un danger. Élaboré à l'origine de manière intuitive, nous l'avons testé et étalonné numériquement puis avons prouvé sa pertinence en le confrontant à des expériences réelles. Il rend compte du phénomène de maximum de pression cinétique à l'interface et de l'influence de la distribution initiale des piétons. Si ses résultats sont seulement semi-quantitatifs, il n'en demeure pas moins d'une bonne efficacité. Ce modèle n'est certes pas celui qui rend compte le plus fidèlement de la réalité, mais il propose une approximation satisfaisante d'une réalité régie par des mécanismes irrationnels et incontrôlables et a le mérite d'être assez simple à implémenter informatiquement et à comprendre.

Pour étalonner ce modèle, nous avons réalisé deux séries d'expériences avec des foules d'élèves en faisant varier la densité et la disposition. Nous avons extrait par pointage manuel sur les vidéos les déplacements des piétons, en tenant compte des déformations liées à la caméra et à la perspective. Nous avons ensuite traité ces données pour faire apparaître les données pertinentes, comme le champ des vitesses, le temps de réponse de la foule ou le temps d'évacuation.

Si le modèle rend assez bien compte de la réalité de nos expériences, il devient moins pertinent quand il s'agit de rendre compte d'autres situations : nous avons par exemple négligé le fait que les piétons pouvaient se pousser, ce qui est central dans le cas de la bousculade de Turin. Nous n'avons également pas tenu compte des phénomènes de groupe qui incitent les individus à privilégier le fait de rester en groupe plutôt que d'assurer leur sécurité personnelle. Pour pouvoir utiliser le modèle dans le domaine de la sécurité, on pourrait déterminer une relation entre le maximum de pression cinétique atteint et les risques encourus par les piétons. Grâce à cette relation, en faisant varier la densité initiale dans la simulation informatique du modèle, les organisateurs d'un événement pourraient ainsi limiter le nombre de participants en fonction du risque qu'ils sont prêts à accepter.

Les recherches sont encore nombreuses à effectuer dans le domaine de la dynamique des piétons, mais nous pensons avoir apporté un éclairage à la problématique de la réaction d'une foule dense face à un danger ponctuel.

# A ANNEXES

## A.1 ÉQUATIONS DU MODÈLE MICROSCOPIQUE ISSU DE [2]

Le modèle d'optimisation de la vitesse est un modèle microscopique à variables continues. Chaque piéton minimise une fonction d'inconfort. Voici les 6 équations régissant ce modèle :

1. Conservation de la matière  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot v_y) = 0$
2. Vitesse locale  $\vec{v} = f(\vec{r}, \theta) \vec{u}_r$
3. Chemin choisi localement  $P^* = \operatorname{argmin}_P \alpha \int_P dS + \beta \int_P \frac{1}{f} dS + \gamma \int_P \frac{g}{f} dS$
4. Potentiel  $\phi$  tel que

$$\begin{cases} \phi(\text{destination cible}) = 0 \\ \|\nabla \phi(x, y)\| = \alpha + \frac{\beta}{f} + \frac{\gamma g}{f} \text{ sinon (coût unitaire)} \end{cases}$$

$$5. \vec{u}_r = \frac{-\vec{\nabla} \phi(x, y)}{\|\vec{\nabla} \phi(x, y)\|}$$

6. Interpolation linéaire de la vitesse locale

$$f(\vec{r}, \theta) = f_{\max} + \frac{\rho(\vec{r} + \epsilon \vec{u}_r) + \rho_{\max}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} (\vec{v}(\vec{r} + \epsilon \vec{u}_r) - f_{\max})$$

### Explications du modèle :

- $\rho$  représente la densité locale de piétons.
- $P^*$  est composé de trois termes : le premier représente le chemin parcouru, le deuxième le temps de parcours, et le troisième le “désagrément” subi le long du trajet ( $g$  est une grandeur de “gêne” qui dépend du chemin parcouru).  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont des constantes qui dépendent de la sensibilité de chaque individu vis-à-vis de chacun des termes (par exemple, une personne pressée aura un  $\beta$  plus grand que la moyenne, alors qu’une personne fatiguée aura un  $\alpha$  plus bas que la moyenne).
- $f$  diminue d’autant plus que la zone à laquelle s’apprête à accéder le piéton est dense en piétons, et d’autant plus grande que les autres piétons de cette zone vont vite.

## A.2 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

**Contexte :** Nous souhaitons réaliser une séquence d’expériences reproduisant la réaction d’une foule plus ou moins dense face à un danger ponctuel, ici, une personne portant un objet atypique.

### Objectifs :

- Observer un mouvement régulier (vague, compression)
- Trouver les paramètres qui influencent les mouvements (densité, nombre de personnes, forme de la pièce...)

### Planning détaillé :

Horaire	Quoi
J-7	Trouver les dates et réserver le grand Hall
J-1	Briefing des personnes « dangers »
J-1 (à 18h30)	Communication sur X2016
M-20	Installation du matériel (vidéo + signalisation)
M-5	Rabattage dans les amphis (slide à la fin)
M-2 à la fin	Accueil
M	Briefing (1min30 pour éviter les jacassements)
M+2	Mise en place de la foule
M+3	1ere expérience
M+5.5	Rassemblement de la foule
M+6 à M+18	Idem (5 expériences)
M+18	Remerciements et communication de la prochaine date

### Installation et matériels :

Expérience	Matériel	Remarques	Responsable
Circulaire	Scotch	3 carrés de 3m, 4.5m et 7m	Rémy (voiture)
Linéaire	Rubalise	Couloir de 1m	Rémy (voiture)
	Chaises	PC	Mathieu
Commun aux deux expériences	Sifflet	Rappel des participants	James
	Moquette	Eviter les chutes	Maxime (Manute)
	GoPro	JTX	Guillaume
	Perche à selfie	Fixation de la GoPro	Jonathan
	Table (buffet)	BE ou PC	Mathieu
	Pistolet	JTX	Guillaume
	2 Gants	Chacun regarde chez soi (ou T-shirt de TOS)	
	2 Bonnets		
	2 Echarpes		
	Quatre-quart ou autre	Buffet	Rémy (voiture)
	Ice Tea		

### Séquence des expériences :

Expérience		Géométrie	Densité	Dimension de la zone	Danger
Lundi	Mardi				
3	1	Circulaire	4 pers.m <sup>-2</sup>	3.5m pour 50pax	Bonnet jaune
4	2	Circulaire	2.5pers.m-2	4.5m pour 50pax	Echarpe jaune
5*	6*	Circulaire	4pers.m-2	3.5m pour 50pax	Pistolet
6*	5*	Circulaire	2.5pers.m-2	4.5m pour 50pax	Pistolet
1	3	Linéaire	4pers.m-2	1m x 13m pour 50pax	Pistolet
2	4	Linéaire	2.5pers.m-2	1m x 20m pour 50pax	Bonnet

\* ces expériences seront réalisées si nous disposons de temps supplémentaire

### Répartition des tâches :

Jour	Tâche	Qui
<b>Lundi</b>	Briefing des personnes « dangers »	Mathieu & James
	Communication sur X2016	Guillaume
	Installation	Mathieu & James
	Rabattage (+ slide)	Jonathan (MAT433) Rémy (MAT432)
	Accueil	James
	Briefing	Guillaume
	Vidéo Go Pro (déplacement entre linéaire et circulaire)	Rémy
	Déroulement expérience	Maxime
	Appel danger	Jonathan
	Surveillance buffet + découpage	Mathieu
<b>Mardi</b>	Briefing des personnes « dangers »	Mathieu & James
	Communication sur X2016	Guillaume
	Installation	Mathieu & James
	Rabattage (+ slide)	James (MAP411) Rémy (BIO452)
	Accueil	Jonathan
	Briefing	Guillaume
	Vidéo Go Pro (déplacement entre linéaire et circulaire)	Maxime
	Déroulement expérience	Rémy
	Appel danger	Mathieu
	Surveillance buffet + découpage	James

### Briefing des participants :

« Bonjour à tous, merci pour votre participation. Vous allez participer à une expérience qui nous aidera à répondre au défi sécuritaire. Initialement, vous allez vous promener dans les carrés délimités par le scotch noir ou dans le couloir délimité par la rubalise selon les consignes données. Un danger visuel symbolisant un danger mortel, de type terroriste, va se déclarer : individu X, différent à chaque expérience, portant un des objets suivants : bonnet, écharpe ou pistolet. Vous devez alors fuir le plus rapidement sans hésiter à bousculer les autres mais

tout en évitant un accident. Vous fuirez dans toutes les directions pour les deux premières expériences, et uniquement dans le couloir délimité par les rubalises dans les deux suivantes. Vous vous arrêterez quand vous vous sentirez en sécurité. Au coup de sifflet, on revient en position initiale. Il y aura au minimum 4 expériences, il faudra être réactif pour avoir le temps de profiter du buffet. »

### A.3 PROTOCOLE DE POINTAGE DES PIÉTONS

#### Avec PyMecaVidéo 6.1 :

- Cliquer sur « définir l'échelle »
- Longueur de l'étalon : 1m
- Tracer la barre étalon : du haut de l'image en bas
- Choisir 1 comme nombre de points.
- Cliquer sur « démarrer »
- Pointer et noter le numéro de l'image où le danger est révélé (même si les gens ne réagissent pas immédiatement)
- Quand un piéton est entièrement pointé : aller dans l'onglet « coordonnées »
- Cliquer sur « copier les mesures »
- Les coller dans un tableur et enregistrer sous le même nom que la vidéo.
- Retourner au tout début de la vidéo (cela évite d'avoir à étalonner à nouveau)
- Répéter ces étapes pour le piéton suivant.
- Faire aussi toute une série de pointage sur un point fixe (chaise, point du quadrillage)

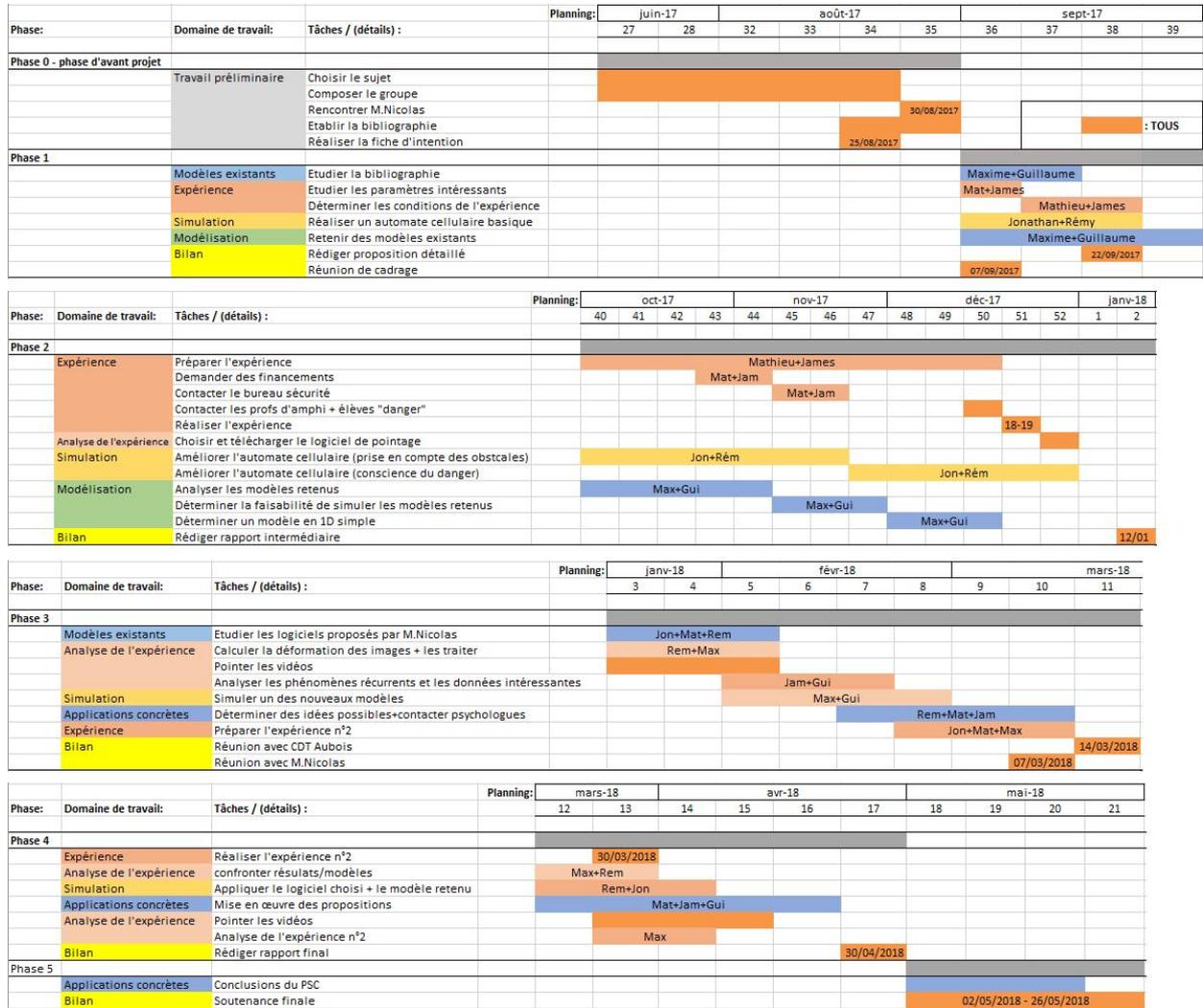
#### Durée des vidéos en secondes et personne qui les traite :

Linéaire #1	5	James
Linéaire #2	6	Rémy
Linéaire #3	8	Maxime
Linéaire #4	9	Guillaume
Circulaire #1	4	Jonathan
Circulaire #2	4	Jonathan
Circulaire #3	5	Mathieu
Circulaire #4	4	Mathieu

#### Remarques :

Pour être sûr de faire une et une seule fois chaque piéton, les numéroter sur une capture d'écran. Il est possible de changer le contraste ou d'utiliser l'outil loupe de Windows pour mieux voir les piétons.

## A.4 DIAGRAMME DE GANTT



## A.5 BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] WARREN, William. Behavioral dynamics approach to collective crowd behavior. *Department of cognitive, linguistic and psychological sciences, Brown University. Conférence.* Construction d'un modèle des forces sociales amélioré avec prise en compte de nombreux paramètres. Interaction entre attitude globale et comportement individuel via modèle des « voisins », modèle du piéton et visualisation des voisins (prise en compte des interactions).
- [2] SCHLAKE, Angelika, BURGER, Martin. Avril 2008. *Mathematical models for pedestrian motion.* Westfälische Wilhelms-Universität Münster. Présentation théorique des différents modèles actuels. Formalisme avec point de vue mathématique, et simulations informatiques.
- [3] CORBETTA, Alessandro, BRUNO, Luca, MUNTEAN, Adrian, TOSCHI, Federico. 2014. High statistics measurements of pedestrian dynamics. *The Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014 (PED2014).* Introduction de la détection avec Kinect<sup>TM</sup> et données statistiques sur les principaux cas de figure.
- [4] NICOLAS, Alexandre, BOUZAT, Sebastian, N. KUPERMAN, Marcelo. Statistical fluctuations in pedestrian evacuation times and the effect of social contagion. *Physical Review E94, 022313 (2016).* Description d'un modèle d'automates cellulaires avec prise en compte de phénomènes de paniques et de contamination lors de tels événements (le mouvement de panique se propage par réaction psychologique).
- [5] LEMERCIER, Samuel. Simulation du comportement de suivi dans une foule de piétons à travers l'expérience, l'analyse et la modélisation. Modélisation et simulation. *Université Rennes 1, 2012. Français.* < NNT : 2012REN1S028 >. Reprise des différents modèles sur la dynamique des piétons et simulations. Étude du phénomène de stop-and-go dans les mouvements de masse.
- [6] THALES, Simulation biomimétique de foules. 2017. *Les InnovDays de Thalès, 1er mars 2017.* [events.thalesgroup.com/INNOVDAYS](http://events.thalesgroup.com/INNOVDAYS)
- [7] MEHRAN, Ramin, OYAMA, Alexis, SHAH, Mubarak, *Abnormal crowd behavior detection using Social Force Model.*
- [8] LEIJONMARCK, Eric, OLERGARD, Thomas, Modelling of panicking pedestrians during emergency evacuation. *Royal Institute of Technology, department of Optimization and Systems Theory. Bachelor's thesis.*
- [9] KORMANOVA, Anna. A Review on Macroscopic Pedestrian Flow Modelling. *Faculty of Management Science and Informatics, University of Žilina, Univerzita 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic.*
- [10] J. L. F. Henderson. On the Fluid Mechanics of Human Crowd Motion. *Transportation Research, 8 (1974) 509-515.*
- [11] ZURIGUEL, Iker, PARISI RICARDO, Daniel, HIDALGO CRUZ, Raül, et al. Clogging transition of many-particle systems flowing through bottlenecks. *Scientific Reports 4 : 7324 | DOI : 10.1038/srep07324, 4 December 2014*
- [12] MOUSSAID, Medhi, HELBING, Dirk, THERAULAZ, Guy. How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters. *PNAS Early Edition, 18 March 2011*
- [13] SEER, Stefan, BAUER, Dietmar, BRANDLE, Norbert, RAY, Marlus. Estimating Pedestrian Movement Characteristics for Crowd Control at Public Transport Facilities. *Procee-*

*dings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems Beijing, China, October 12-15, 2008*

[14] WONHO, Kang, YOUNGNAM, Han. A Simple and Realistic Pedestrian Model for Crowd Simulation and Application. *arXiv :1708.03080v2 [cs.MA] 13 Aug 2017*

[15] TORDEUX, Antoine, CHRAIBI, Mohcine, SEYFRIED, Armin. Collision-free speed model for pedestrian dynamics. *arXiv :1512.05597v1 [physics.soc-ph] 17 Dec 2015*

[16] CHRAIBI, Mohcine, SCHADSCHNEIDER, Andreas, SEYFRIED, Armin. Chapter 2 On Force-Based Modeling of Pedestrian Dynamics. *Modeling, Simulation and Visual Analysis of Crowds A Multidisciplinary Perspective. 2013. ISBN : 978-1-4614-8482-0*

[17] STROCHLE, Johannes. How do pedestrian crowds react when they are in an emergency situation - models and software. *December 19th 2008, University of Illinois at Urbana-Champaign*

[18] GOATIN, Paola. Macroscopic modeling and simulation of crowd dynamics. *Inria Sophia Antipolis - Méditerranée ICERM, Brown University, August 21-25, 2017*

[19] KWAK, Jaeyoung, JO, Hang-Hyun, LUTTINEN, Tapio, KOSONEN, Iisakki. Modeling pedestrian switching behavior for attractions. *Transportation Research Procedia 2 (2014) 612 – 617 The Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014 (PED2014)*

[20] G. LOVAS GUNNAR. Modeling and Simulation of Pedestrian Traffic Flow. *Department of Mathematics, University of Oslo, P.O. Box 1053, 0316 Oslo, Norway. Transpn. Res :B. Vol. 288, No. 6, pp. 429-443, 1994*

[21] DEGOND, Pierre. Pedestrian macroscopic models : game-theoretic vs mechanistic viewpoints. *Department of Mathematics, Imperial College London. Pierre Degond - Pedestrians macroscopic models - ICERM, Brown Univ., 21/08/2017*

[22] CIOCANEL, Veronica. Pedestrian traffic models. *Mathematical Biosciences Institute The Ohio State University December 1, 2014*

[23] KANMEUGNE SIMO, Patrick. Simulation crédible des déplacements de piétons en temps réel : modèle microscopique à influence macroscopique. *Intelligence artificielle [cs.AI]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2014. Français. <tel-01066477>*

[24] HELBING, Dirk, J. FARKAS, Illés, MOLNAR, Péter, VICSEK, Tamas. Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations. *Institute for Economics and Traffic, Faculty of Traffic Sciences "Friedrich List", Dresden University of Technology, D-01062 Dresden, Germany. Department of Biological Physics, Eötvös University, Pazmany Péter Sé-tany 1A, H-1117 Budapest, Hungary. Center for Theoretical Studies of Physical Systems, Clark Atlanta University, James P. Brawley Drive, Atlanta, Georgia 30314, USA*

[25] HELBING, Dirk, MOLNAR, Péter. Social force model for pedestrian dynamics. *Institute of Theoretical Physics, University of Stuttgart, 70550 Stuttgart, Germany arXiv :cond-mat/9805244v1 [cond-mat.stat-mech] 20 May 1998*

[26] HELBING, Dirk, MOLNAR, Péter. Social force model for pedestrian dynamics. *Institute of Theoretical Physics, University of Stuttgart, 70550 Stuttgart, Germany Physical Review E, 5 January 1995*

[27] Site de la sécurité routière, [securite-routiere.gouv.fr/conseils-pour-une-route-plus-sure/conseils-pratiques/ma-conduite/vitesse](http://securite-routiere.gouv.fr/conseils-pour-une-route-plus-sure/conseils-pratiques/ma-conduite/vitesse)