



HAL
open science

Modélisation des phénomènes de panique dans le cadre de la gestion de crise

Haifa Abdelhak

► **To cite this version:**

Haifa Abdelhak. Modélisation des phénomènes de panique dans le cadre de la gestion de crise. Intelligence artificielle [cs.AI]. Université du Havre, 2013. Français. NNT : . tel-01356721

HAL Id: tel-01356721

<https://theses.hal.science/tel-01356721>

Submitted on 26 Aug 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

Université du Havre

LITIS - Laboratoire d'Informatique, de Traitement de
l'Information et des Systèmes

THÈSE

en vue d'obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DU HAVRE

Discipline : **Informatique**

Haïfa Abdelhak

24 Octobre 2013

Modélisation des phénomènes de panique dans le cadre de
la gestion de crise.

DOMINIQUE ARCHAMBAULT	THIM, Université de Paris 8	Rapporteur
GÉRARD H. E. DUCHAMP	LIPN, Université de Paris 13	Rapporteur
MAROUA BOUZID	GREYC, Université de Caen	Examinatrice
NATHALIE CORSON	LMAH, Université du Havre	Examinatrice
DAMIENNE PROVITOLLO	GÉOAZUR, Sophia-Antipolis	Examinatrice
DAMIEN OLIVIER	LITIS, Université du Havre	Directeur de thèse

Remerciements

Avant d'entamer la rédaction de ce manuscrit, je souhaite exprimer mes vifs et sincères remerciements à tous ceux qui m'ont aidée par le geste et par la parole à la finalisation de ce travail de thèse.

En premier lieu je tiens à remercier sincèrement mon directeur de thèse Damien Olivier celui qui m'a donné l'envie de faire de la recherche et m'a alimenté continuellement en perspectives motivantes. C'est grâce à lui qu'elle a abouti et aussi grâce à lui que j'ai développé mes connaissances et mes compétences dans divers domaines.

Je remercie également Frédéric Guinand, Cyrille Bertelle et Aziz Alaoui de m'avoir donné confiance depuis mon master, de leur aide, de leur disponibilité et de leurs conseils durant cette période. Merci à Rodolphe Charier et Jean Louis Tetrel pour leurs relecture très attentives de mon manuscrit et leurs nombreuses remarques qui m'ont permis de l'améliorer.

Je tiens à remercier Gérard H. E. Duchamp et Dominique Archambault pour avoir accepté de rapporter sur cette thèse. Leurs remarques et leurs suggestions m'ont été très précieuses. Merci à mes examinatrices Damienne Provitolo, Maroua Bouzid et Nathalie Corson pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture de ma thèse.

Mes remerciement s'adressent également aux membres du laboratoires LITIS et particulièrement aux membres de l'équipe RI2C. Je remercie particulièrement Antoine Dutot, Stéphane Balev, Yoann Pigné et Véronique Jay pour leurs conseils et leurs aides précieuses. Je voudrais remercier aussi les membres du laboratoire LMAH pour leurs gentillesse et pour leurs aides sympathiques tant sur le plan scientifique qu'humain. Je tiens à remercier Nathalie Corson avec qui j'ai eu la chance de travailler lors de ma thèse.

Merci aux anciens et aux nouveaux doctorants du LITIS et du LMAH avec qui j'ai passé des bons moments. Merci à Claire Roussin pour votre disponibilité.

Merci à Antoine et à ma belle famille pour leur présence et leur disponibilité.

Au terme de ces remerciements, j'exprime ma gratitude à mes parents et ma famille, qui m'ont toujours soutenue dans tout ce que j'entreprends. Merci du fond du cœur pour vos conseils, votre présence malgré la distance et votre amour. Je termine par un grand merci à ma miss *Lyssia* qui m'a soutenue et « aidée » durant la rédaction de ce manuscrit.

À mes parents.

Table des matières

Table des matières	iii
Table des figures	v
1 Introduction	1
1.1 Le problème	3
1.2 Contribution	5
1.3 Organisation du document	7
1.4 Une autre vue du manuscrit	9
2 La foule : éléments de compréhension	11
2.1 Introduction	11
2.2 La foule	12
2.3 Travaux d'étude et de modélisation des mouvements de foule	23
2.4 Synthèse du chapitre	46
3 Les comportements dans le cadre d'une évacuation	51
3.1 Introduction	51
3.2 Aspects psychologiques relatifs à l'évacuation	52
3.3 Modélisation cognitive des comportements	60
3.4 Le comportement humain durant une catastrophe et ses conséquences sur la mobilité	70
3.5 Synthèse du chapitre	75
4 Méthodologie et éléments d'une démarche de modélisation du phénomène de panique dans les mouvements de foule	77
4.1 Introduction	77
4.2 Modélisation de l'environnement	78
4.3 Modélisation cognitive de l'individu	81
4.4 Modélisation de la panique et de son processus de propagation	89
5 Modèle de mobilité et modèle émotionnel	95

Table des matières

5.1	Introduction	95
5.2	Modélisation de l'environnement	96
5.3	Approche cognitive de modélisation	105
6	Le modèle de panique : amorce et propagation de la panique dans une foule en mouvement	129
6.1	Introduction	129
6.2	Le modèle de panique	130
6.3	Intégration de la panique dans le modèle mobilité	136
7	Expérimentations et étude des résultats	141
7.1	Introduction	141
7.2	Implantation du modèle	142
7.3	La phase d'infection	144
7.4	Phase de contagion : propagation de la panique sans la mobilité . . .	146
7.5	La phase de contagion : propagation de la panique avec la mobilité .	164
7.6	Synthèse du chapitre	172
8	Approche agrégative de modélisation des phénomènes de panique dans une foule	175
8.1	Introduction	175
8.2	Présentation du modèle dynamique	176
8.3	Étude « théorique » du modèle	178
8.4	Études numériques du modèle	180
8.5	Complémentarité entre l'approche agrégative et l'approche individuelle	183
8.6	Synthèse du chapitre	188
	Conclusion et perspectives	189
	Bibliographie	193
	Webographie	205

Table des figures

1.1	Formation de file spontanée de déplacement au passage piéton du « Shibuya crossing » à Tokyo, le Japon (©flickr)	2
1.2	Trajectoires possibles du comportement de la foule après une perturbation qui produit un tropisme au niveau de la foule	3
1.3	Boucle systémique de la panique.	6
2.1	Illustration du processus de transition d'une foule physique à une foule psychologique.	12
2.2	Représentation de deux foules	13
2.3	Une proposition de typologie de foule [20].	17
2.4	Simulations montrant la formation de comportements émergents	20
2.5	Simulations montrant la formation de comportements émergents	20
2.6	Discrétisation d'une pièce en 3D en cellule de taille identique	26
2.7	Les différentes possibilités de déplacement d'un individu et sa matrice de préférence $M = (M_{ij})$ [19].	28
2.8	Position et déplacement d'un individu [143].	30
2.9	Simulation d'une évacuation dans une pièce avec une seule sortie à l'aide du modèle d'automate cellulaire	31
2.10	Illustration de l'évolution du flux d'évacuation	32
2.11	Agents avec leurs deux champs de confort et d'influence selon le modèle de Zarboutis [144].	38
2.12	Discrétisation d'une portion de l'espace sous forme de graphe de sites non orientés [8].	40
2.13	Deux aperçus écran du modèle d'agent cellulaire situé	41
2.14	Simulation d'une évacuation avec l'outil MASSEgress d'un bâtiment sur deux étages disposant de deux issues de secours	42
2.15	Expérimentations d'évacuation sur des fourmis dans un environnement contenant deux sorties positionnées symétriquement	45
2.16	Dispersion de la prise en compte des propriétés physiques et comportementales des différentes approches de modélisation	48

Table des figures

3.1	Le dieu Pan.	52
3.2	Le modèle séquentiel IMC (Intelligence-Modélisation-Choix) d'Herbert Simon	63
3.3	Le modèle décisionnel de Mintzberg, Raisinghani et Théorêt [80].	64
3.4	Illustration du modèle d'évaluation émotionnelle de Scherer <i>component process model (CPM)</i> [116].	69
3.5	Illustration du modèle des phénomènes de panique de Quarantelli [99].	74
4.1	Subdivisions successives de l'espace jusqu'à convergence.	79
4.2	Élaboration de l'environnement virtuel des agents en se fondant sur un environnement réel	80
4.3	Partition de l'environnement selon l'approche région	80
4.4	Architecture cognitive de l'agent.	83
4.5	L'ensemble des attributs d'un agent.	85
4.6	Module de perception.	87
4.7	Le module émotionnel.	88
4.8	Module de raisonnement.	89
4.9	Diagramme de transmission du modèle SI.	91
4.10	Diagramme de transmission du modèle SIR.	93
5.1	Représentation de l'environnement virtuel des agents en trois dimensions.	98
5.2	Représentation de l'environnement virtuel des agents en deux dimensions	99
5.3	Le coût des arêtes du graphe d'adjacence est calculé à partir de la distance entre le centre de deux cellules adjacente du Quadtree.	100
5.4	Le graphe d'adjacence issu de la décomposition en région de l'environnement 5.2.	101
5.5	Un exemple d'environnement virtuel incluant des obstacles (en noir), des portes (en jaune) et une population d'agent.	106
5.6	Distance cartésienne entre l'individu I et un voisin V	108
5.7	Évitement des obstacles fixes par un individu du modèle	109
5.8	Calcul de la nouvelle position $Pos_{(xy)}(t_{n+1})$ de l'individu suite à une détection d'un obstacle fixe.	110
5.9	Détection de collision de face à un instant t_n par extrapolation de trajectoire entre deux individus	111
5.10	Illustration du processus de détection de collision entre deux individus	111
5.11	Modèle d'émotion tridimensionnel de Plutchik [95] comparé à l'espace HSV [136]	114
5.12	Espace bidimensionnel de Russel formé par les dimensions plaisant/déplaisant et activation/désactivation [110].	115
5.13	Espace tridimensionnel de l'émotion (<i>PAD space</i>) proposé par Russel et Mehrabian	116

5.14	Espace tridimensionnelle de l'émotion (<i>RIC space</i>) basé sur l'approche de Russel et Mehrabian.	121
5.15	Trace de l'évolution de l'émotion (neutre) dans le temps en terme d' <i>Implication</i> et de <i>Relevance</i>	124
5.16	Le modèle de mobilité.	126
6.1	Modèle compartimental de propagation de la panique.	132
6.2	Dynamacité des émotions positives selon le taux de croissance Cp_i et le taux de décroissance Dp_i et des émotions négatives selon le taux de croissance Cn_i et le taux de décroissances Dn_i	134
6.3	La propagation de la panique par contact entre les individus susceptibles de paniqués (PSP) et les individus paniqués (PP).	134
6.4	Modèle de mobilité et de propagation de la panique.	138
7.1	Représentation de l'individu dans le modèle.	142
7.2	Capture écran de la vue représentant un environnement virtuel	143
7.3	Capture écran de la vue du graphe d'adjacence	144
7.4	Capture écran de la vue représentant un environnement virtuel	145
7.5	Capture écran de la vue représentant l'évolution de la population	146
7.6	Formation des compartiments issus de la phase d'infection	146
7.7	Modèle compartimental de propagation de la panique	148
7.8	Courbe de diffusion de la panique dans une population statique	150
7.9	Évolution de l'émotion d'un individu non paniqué	151
7.10	Courbe de propagation de la panique dans une population	152
7.11	Courbe de propagation de la panique dans une population	153
7.12	Effet du réseau social sur la diffusion de la panique	154
7.13	Effet de la dynamacité de l'émotion sur la diffusion de la panique	156
7.14	Conséquence de la variation du taux de croissance sur la diffusion de la panique	157
7.15	Effet de la virulence du stimulus sur la diffusion de la panique	159
7.16	Scénario 1 :Représentation d'une population composé de deux groupes d'individus	160
7.17	Sénario 2 :Représentation d'une population composé de trois groupes d'individus	160
7.18	Illustration de la diffusion de la panique dans la population du premier scénario	161
7.19	Illustration de la diffusion de la panique dans la population du deuxième scénario	162
7.20	Effet du taux de contact inter-individus sur la propagation de la panique	162
7.21	Illustration de la diffusion de la panique pour une population initiale formée par les deux groupes d'individus	163

Table des figures

7.22	Illustration de la diffusion de la panique pour une population initiale composée de trois groupes d'individus	163
7.23	Évolution de la propagation de la panique dans une population de faible densité composée de deux groupes isolés.	165
7.24	Effet de la mobilité sur l'évolution de la panique.	166
7.25	Séquence de propagation de la panique dans une population en mouvement.	168
7.26	Simulation de déplacement des individus vers une sortie en absence et en présence de la panique	169
7.27	Émergence du phénomène de prise en masse dans une population	170
7.28	Effet de l'émergence du phénomène de prise en masse pour une population de 200	171
7.29	Effet de l'émergence du phénomène de prise en masse pour une population de 100	171
7.30	Impact de la panique sur la pression exercé sur les individus de la foule	172
8.1	Modèle compartimental de propagation de la panique	176
8.2	Capture écran de l'implémentation du système dynamique sous Netlogo [87].	181
8.3	Courbe de propagation de la panique pour un nombre de reproduction de base $R_0 = 1.66 > 1$	182
8.4	Courbe de propagation de la panique pour un nombre de reproduction de base $R_0 = 0.6 < 1$	183
8.5	Courbe de propagation de la panique associée à l'implémentation individualisé sous NetLogo	186
8.6	Courbe de propagation de la panique associée à l'implémentation de l'approximation d'Euler du modèle agrégatif sous NetLogo	187
8.7	Courbe de propagation de la panique associée à l'implémentation individualisé sous NetLogo	188

Chapitre 1

Introduction

1.1	Le problème	3
1.2	Contribution	5
1.3	Organisation du document	7
1.4	Une autre vue du manuscrit	9

Les sociétés animales ou humaines, sont les lieux d'activités collectives, produits de comportements individuels et d'interactions inter-individus et environnementales. Au sein des collectifs, la diversité, l'hétérogénéité s'expriment et laissent apparaître des formes d'organisation autonome. Autant il est facile d'observer dans la nature la cohérence des déplacements des bancs de poissons ou des vols d'oiseaux, autant la collectivité humaine présente elle aussi cette fascinante capacité d'organisation.

Dans une rue, par exemple où chaque individu possède des habitudes de marche et des objectifs spécifiques, on voit apparaître des structures spontanées de déplacement sans aucun accord préalable (figure 1.1). Cette coordination des mouvements semble être contrôlée par un profond désir d'organisation. Cependant, quand on observe de plus près les déplacements, on identifie des comportements fondés sur des principes d'évitement, de ralentissement ou de changement de direction. En effet, c'est à partir de ce fonctionnement individuel qu'apparaît la coordination et l'organisation du collectif.

Pour expliquer ces phénomènes, différents schémas d'organisation se dégagent. Deux orientations dominent. Le premier type d'organisation est hiérarchisé, dans lequel les individus dépendent d'un statut fixe au sein du collectif. Les processus sont alors centralisés par les individus de plus forte potentialité. Le deuxième type d'organisation est émergent. Dans ce schéma, l'information est locale et chaque individu en détient une partie. C'est en effet une structure décentralisée, reposant sur un processus d'interaction et un processus d'auto-organisation, un exemple typique de système complexe. Soumise à des influences de différentes échelles l'organisation émergente contraint les entités qui la composent à modifier leurs états ou comporte-

1. Introduction



FIGURE 1.1: Formation de file spontanée de déplacement au passage piéton du « Shibuya crossing » à Tokyo, le Japon (©flickr).

ments. Un mécanisme de rétroaction se met alors en place décrivant l'effet de retour du système sur lui-même (figure 1.2). La rétroaction sera par conséquent négative si elle s'oppose à la variation du système et positive si elle l'amplifie.

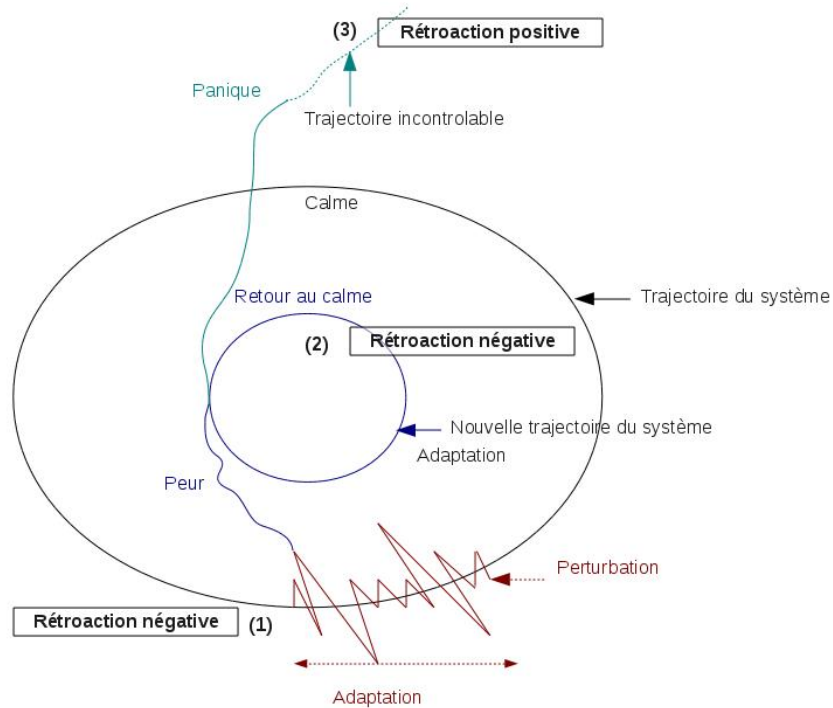


FIGURE 1.2: Trajectoires possibles du comportement de la foule après une perturbation qui produit un tropisme au niveau de la foule. Plusieurs cas peuvent être observés : (1) Le mécanisme de rétroaction négatif domine et réduit la dérive, le système retourne donc dans sa trajectoire initiale et retrouve un état d'équilibre. (2) La dérive est amplifiée par le mécanisme de rétroaction positive. Le système trouve une nouvelle trajectoire stable et un état homéostatique. Le système a fait preuve d'adaptation. (3) Le système s'emballe et ne trouvera pas de trajectoire d'équilibre.

1.1 Le problème

Nous nous intéressons dans ce travail de recherche à des ensembles d'individus composant une foule. Dans la littérature la foule est définie comme une organisation émergente par sa structure, complexe par sa dynamique collective [70, 28]. C'est un système complexe social qui selon la nature des perturbations et des interactions, s'auto-organise efficacement et produit une solution adaptée aux perturbations rencontrées, à l'instar des insectes sociaux comme les fourmis. Cependant, dans cer-

1. Introduction

taines situations le même processus d'auto-organisation produit des comportements collectifs inadaptés, où les conséquences peuvent être dramatiques. L'effondrement de l'organisation de cette masse humaine fait ressortir sa fragilité. S'ajoutent à cela une disproportionnalité considérable entre l'événement perturbateur et la façon dont il dégénère en catastrophe, ce qui rend la foule redoutée en cas de catastrophe.

L'histoire humaine dénombre malheureusement de nombreux mouvements de foule meurtrière qui se produisent généralement suite à des perturbations environnementales, d'origine humaine voire même imaginaire. En juillet 1990 par exemple, une violente bousculade se produit dans un tunnel de Mina, au sud de la Mecque, faisant 1426 morts. En Août 1994, à Brazzaville, au moins 150 personnes, en majorité des enfants meurent, piétinées ou étouffées dans un mouvement de panique à la fin d'une séance d'évangélisation dans une église. En Août 2005 en Irak, plus de 1000 personnes participant à un pèlerinage, meurent piétinées ou noyées dans un mouvement de panique sur un pont du Tigre à Bagdad, provoqué par une rumeur sur la présence de deux kamikazes dans la foule [71].

Les perturbations subies par un collectif dissolvent l'individu dans la foule, les comportements varient et aboutissent à l'apparition des phénomènes de panique amenant à des mouvements inadéquats voire même chaotiques tels que les bousculades et les piétinements. La panique initie souvent une rupture dans les comportements individuels et collectifs. Il est intéressant de faire le rapprochement avec la vision de René Thom et sa théorie des catastrophes [127] qui cherche à décrire comment une succession de modifications infimes provoquent parfois une brisure de la continuité de la trajectoire du système considéré. Le terme catastrophe employé par Thom ne doit pas cependant conduire à une ambiguïté, il la pense en rupture de forme et non pas en désastre. Ses travaux sont prolongés par Zeeman [63] qui les applique dans le champ des sciences humaines en particulier sur les dynamiques d'opinion.

L'étude des phénomènes de panique dans une foule, champ de recherche actuel pluridisciplinaire, ouvre l'espoir de pouvoir réguler et anticiper les phénomènes dangereux afin de mieux protéger la population. Un grand nombre d'études réalisées ont été fortement motivées par un intérêt applicatif évident dans divers domaines, depuis l'aménagement du territoire jusqu'à la planification et la gestion des évacuations dans les grands édifices. C'est dans ce contexte que se placent les travaux que nous présentons ici. Ce travail est une contribution à la connaissance des mécanismes comportementaux lors des phénomènes de panique dans une foule et s'inscrit dans une démarche de prévention et d'anticipation des risques et des crises. Il nous a semblé alors nécessaire d'étudier la littérature en psychologie et en science sociale afin de pouvoir doter les individus que nous modélisons des facteurs psychologiques

qui influent sur le comportement. Nos ambitions de recherche sont de proposer une nouvelle approche de modélisation des phénomènes de panique. Nous défendons une démarche basée sur l'étude du phénomène au niveau de l'individu, dès lors que ce dernier constitue l'entité influente dans une foule. Il nous paraît important de définir d'une manière claire ce dernier ainsi que son processus comportemental et émotionnel en situation de danger. Ceci passe par la présentation de ces processus tels que proposés dans la littérature en science sociale et en science cognitive. Cela se justifie d'autant plus que les modèles existants ne permettent ni l'intégration des caractéristiques cognitives de l'individu, ni leurs prises en compte dans la description des phénomènes de panique.

1.2 Contribution

La littérature en science sociale met en évidence une divergence de vue sur le processus d'amorce de la panique et sa propagation dans une foule. Selon Jean Pierre Dupuy [37] cette divergence a donné naissance à deux écoles de pensée à savoir, l'école Française et l'école Américaine. En effet, l'école Française considère que la perception d'un danger conduit à la dissolution de l'individu dans la foule et lui fait perdre sa capacité de raisonnement et de prise de décision. Le comportement de l'individu devient alors irrationnel et inadéquat et se transmet par interaction sociale. L'école Américaine concède l'existence de la panique, mais considère que les comportements sont plutôt non-rationnels qu'irrationnels, ce qui permet de garder une certaine lucidité et une capacité de prise de décision face aux événements.

Notre travail se positionne dans la logique de l'école Française pour la modélisation du processus de propagation de la panique, qui reprend à son compte l'hypothèse de L. Crocq selon laquelle la panique est « une épidémie psychologique ». Cette métaphore a orienté notre travail et nous a conduit à nous inspirer de différents travaux dans le domaine de l'épidémiologie. Nous proposons pour cela un processus de propagation de la panique similaire à un phénomène contagieux et transmissible tel une épidémie. Ces ambitions de recherche nous amènent à décomposer le travail en deux grandes parties interdépendantes et complémentaires à savoir une étude de la mobilité et une étude des phénomènes de panique. L'étude de la mobilité est à la base du système. Elle permet la compréhension des processus de déplacement des individus dans une foule, et la création d'un modèle de mobilité servant de socle pour l'étude des phénomènes de panique. L'intégration du modèle de panique vient modifier le patron de mobilité¹ en modifiant l'écoulement du système. La

1. Un patron de mobilité est une forme récurrente apparaissant dans la succession des différentes valeurs prises par un (groupe d')individu(s) pour une dimension donnée (motivation, localisation, activité, etc.) [22].

1. Introduction

mobilité et la panique forment ainsi un système, ils interagissent et s'influencent mutuellement faisant apparaître des propriétés émergentes d'amplification et/ou de régulation (figure 1.3).

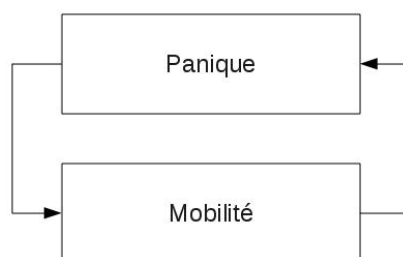


FIGURE 1.3: Boucle systémique de la panique.

Nous nous sommes concentrés sur une modélisation de mouvements réalistes d'individus en interaction avec un environnement dynamique. La modélisation des individus est fondée sur une approche individu-centrée qui permet l'intégration des propriétés physiques et psychologiques humaines dans des individus virtuels. Ce qui assure l'apparition de divers comportements émergents. Nous aspirons à pouvoir contribuer au développement des modèles de mouvement de foule dans le cadre de catastrophe en présence d'individus hétérogènes, en les dotant de différents critères psychologiques (*e.g* l'impatience, la fragilité psychologique) et physiques (*e.g* la vitesse).

Notre contribution globale est un nouveau cadre pour la simulation des mouvements de foule lors d'une grande perturbation. Une mise en œuvre d'une plate-forme de test qui permet de simuler le flux de mouvement d'individus hétérogène de façon autonome et réaliste. Ainsi nos contributions majeures sont les suivantes :

- Un modèle de mobilité d'individu autonome qui se base sur les propriétés cognitives humaines allant de la perception et l'analyse de l'environnement jusqu'à la détermination de la trajectoire de déplacement ;
- Un modèle de panique décrivant le processus d'apparition de la panique chez l'individu et sa propagation dans la foule.

Notre modèle permet de simuler une grande variété de comportements émergents tels que :

- La formation de lignes de déplacements ;
- La formation de voûtes devant une sortie ;

- L'apparition de comportements d'évitement pendant les déplacements ;
- L'apparition de comportements structurés tel que des files d'attentes.

Nous nous intéressons également à l'étude du problème selon une approche agrégative. Cette approche de modélisation permet une description de la trajectoire à travers des variables du système et un suivi de l'évolution générale du système. Cependant, la non-linéarité du système complexe étudié rend difficilement prédictibles les comportements issus des interactions entre les différentes entités du système. Pour cela, nous avons choisi de représenter le même système à deux niveaux d'abstraction différents sans les opposer, afin de tirer profit des avantages de chaque approche. Les deux modèles s'enrichissent mutuellement en ayant recours l'un à l'autre.

Dans cette démarche originale d'étude du problème, nous visons à renforcer la complémentarité des modèles agrégatifs et des modèles comportementaux pour traiter des phénomènes concrets à différents niveaux d'échelle et de description.

1.3 Organisation du document

Après une introduction, le deuxième chapitre s'intéresse à la notion de foule dont nous étudions le comportement en cas de présence des phénomènes de panique. Nous dressons tout d'abord un bilan des typologies que peut prendre la foule et des capacités d'auto-organisations avec leurs conséquences sur les comportements d'évacuation. Par la suite nous décrivons plus en détail les différentes approches de modélisation de la foule dans une situation de crise. Nous verrons que la plupart des modèles proposés couvrent soit la dimension physique soit la dimension cognitive d'un individu. Rassembler ces deux dimensions est l'objectif principal de notre travail.

Le troisième chapitre est dédié à l'étude de la dimension cognitive du comportement de l'individu dans le contexte d'évacuation. Nous décrivons les aspects psychologiques relatifs à l'évacuation et nous faisons en particulier le point sur les conditions d'amorce de l'émotion de panique. Nous présentons également dans ce chapitre une description du processus comportemental des personnes, à savoir le processus de décision allant de la perception à l'action. Nous présentons ensuite quelques modèles décisionnels sur lesquels nous nous appuyerons par la suite pour construire l'architecture cognitive des individus. Le but de ce chapitre est de comprendre les raisons de notre démarche cognitive de modélisation des individus et les apports qui en découlent sur la modélisation des comportements de la foule.

Les deux chapitres précédents fournissent les notions nécessaires à la présen-

1. Introduction

tation de notre modèle. Le quatrième chapitre présente donc ce dernier en détail ainsi que notre démarche de modélisation. Deux axes d'études sont développés : un premier axe pour la modélisation de la mobilité et un second axe pour la modélisation de la panique. Nous présentons dans la première partie de ce chapitre notre démarche de modélisation de l'environnement fondée sur le principe de structuration. Cette technique permet de réduire la complexité au niveau des calculs et ce en représentant l'espace sous forme de graphe valué, où un nœud représente une région de l'espace et une arête le lien entre deux régions adjacentes. Nous présentons par la suite sommairement l'architecture de l'individu qui s'appuie sur une architecture d'agent cognitif (*Beliefs Desire Intention* (BDI)). Nous nous appuyons principalement sur cette architecture pour la conception des individus autonomes et capables d'interagir avec leurs environnements et s'adapter aux variations de ces derniers. Nous présentons dans la deuxième partie du chapitre la panique et les concepts nécessaires à la modélisation de sa propagation dans une foule. En effet, le rapprochement fait entre la panique et une épidémie nous permettra de concevoir un modèle de propagation de la panique inspiré des modèles épidémiologiques et plus précisément du modèle compartimental SIR proposé par W. Kermack et A. McKendrick. Ce chapitre contient par conséquent les éléments nécessaires à la construction du modèle de mobilité et du modèle de propagation de la panique.

Le cinquième chapitre présente une description détaillée du modèle de mobilité présenté dans le chapitre précédent. Il décrit dans un premier temps les phases de construction du modèle de l'environnement, puis dans un second temps l'architecture cognitive de l'individu. Au-delà de cette démarche cognitive de modélisation des individus, nous proposons d'intégrer la notion d'émotion à cette dernière. Nous présentons pour cela une étude sur la notion d'émotion puis nous donnons un historique des modèles émotionnels proposés dans la littérature. Nous construisons par la suite un modèle émotionnel que nous intégrons dans l'architecture cognitive des individus.

Nous formulons dans le chapitre six un modèle de panique utilisant le modèle émotionnel pour décrire le processus d'apparition de la panique chez l'individu et le modèle compartimental pour représenter son mécanisme de propagation dans la foule. Le modèle de panique est ensuite intégré au modèle de mobilité comme étant un module interne à ce dernier. Il se déclenche cependant à l'amorce de l'émotion de panique et peut produire des comportements « non-rationnel » à tendance *asociale*.

Le septième chapitre décrit les expérimentations menées sur le modèle général. Nous étudions en premier la propagation de la panique dans une foule en l'absence de mobilité. Nous intégrons par la suite la mobilité et nous effectuons des séries de tests qui permettront d'analyser l'influence de la panique sur la mobilité et sur les

comportements.

Dans le chapitre huit, nous présentons notre approche agrégative de modélisation des phénomènes de panique dans une foule associée au modèle du chapitre 6. Nous proposons un modèle mathématique utilisant des équations différentielles ordinaires. Nous effectuons une étude théorique et une étude numérique de ce système d'équation qui permettent d'étudier l'équilibre trivial, l'équilibre endémique et de déterminer le nombre de reproduction de base R_0 . Nous confrontons par la suite les résultats obtenus avec ceux obtenus avec l'approche individu-centrée.

1.4 Une autre vue du manuscrit

Nous proposons une vue du manuscrit avec une carte heuristique afin d'avoir une représentation visuelle de notre méthodologie de travail et pour permettre de suivre le cheminement de notre approche de raisonnement.

1. Introduction

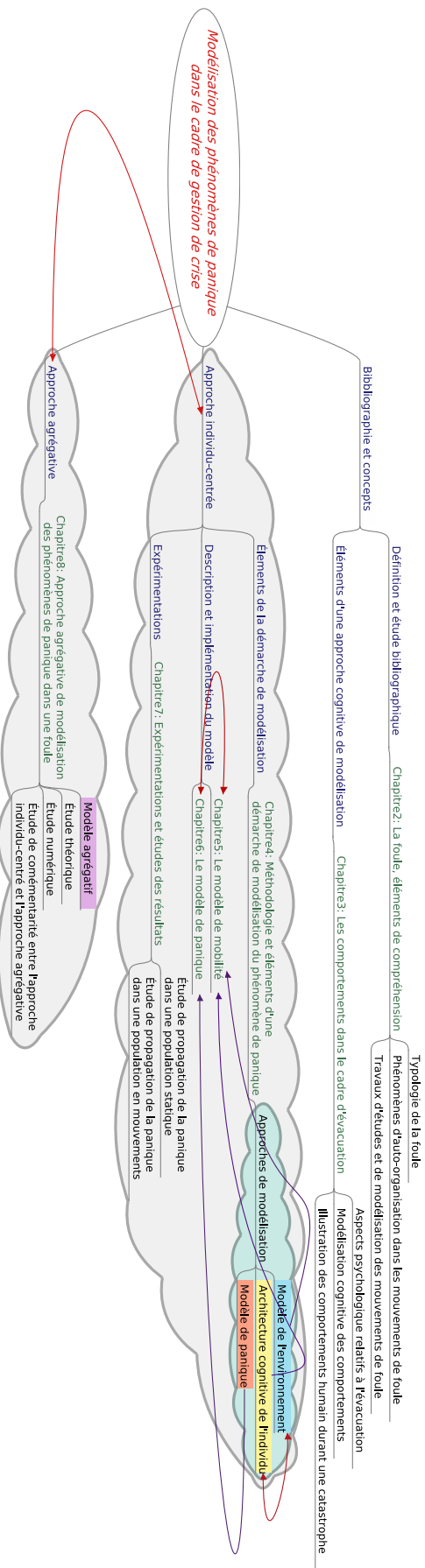


TABLE 1.1: Plan du manuscrit sous forme de carte heuristique.

La foule : éléments de compréhension

2.1	Introduction	11
2.2	La foule	12
2.2.1	Définition	12
2.2.2	Typologie de la foule	14
2.2.3	Les phénomènes d'auto-organisation dans les mouvements de foule	17
2.3	Travaux d'étude et de modélisation des mouvements de foule	23
2.3.1	Les modèles d'automates cellulaires	25
2.3.2	Les modèles de gaz sur réseau (<i>Lattice gas model</i>)	29
2.3.3	Les modèles de la dynamique des fluides	33
2.3.4	Les modèle de forces sociales	34
2.3.5	Les modèles fondés sur les agents	37
2.3.6	Les modèles de la théorie des jeux	43
2.3.7	Les modèles fondés sur les expériences sur les animaux	44
2.4	Synthèse du chapitre	46

2.1 Introduction

Au sens ordinaire le terme de foule est assimilé à celui de groupe. Elle est donc constituée par la réunion d'un ensemble d'individus de culture, de caractéristiques et d'objectifs divers ayant une même proximité spatiale. Cependant la notion de foule va au delà de cette vision, constituant une forme particulière d'un groupe comme nous allons le développer dans ce chapitre. Ainsi, nous proposons dans la suite une définition de la foule ainsi qu'une typologie de cette dernière afin de mettre en évidence les éléments qui la caractérisent. Nous présentons également la dynamique interne de la foule, facteur important dans les mouvements de collectifs qui l'animent. Dans la seconde partie de ce chapitre, nous analysons quelques modèles de foule existants afin de mettre en œuvre les éléments qui les caractérisent, puis nous présentons les phénomènes importants observés lors des mouvements de foule que ces modèles permettent de simuler.

2.2 La foule

2.2.1 Définition

Si une foule est une agglomération d'individus en interaction, il est important dans le cadre de notre travail de distinguer une foule physique d'une foule psychologique. La notion de foule physique se confond avec la notion de groupe, les individus partagent simplement une localisation. Par contre, dans une foule psychologique les individus partagent non seulement un même lieu mais aussi une forme d'unité mentale formant de ce fait une entité sociale propre. Selon Le Bon, sous l'effet d'une excitation convenable, un ensemble d'individus de buts et caractères différents forment une foule organisée.

« Dans certaines circonstances données, et seulement dans ces circonstances, une agglomération d'hommes possède des caractères forts différents de ceux de chaque individu qui la compose....La collectivité est alors devenue, faute d'une expression meilleure, j'appellerai une foule organisée, ou, si l'on préfère une foule psychologique. Elle forme un seul être et se trouve soumise à la loi de l'unité mentale des foules. » [70].

La foule psychologique est donc une organisation émergente, résultat d'une perturbation d'un collectif décentralisé (figure 2.1). Les sentiments et la préoccupation de tous s'orientent vers la même direction, les individus fusionnent dans une « âme collective »¹ au sein de laquelle l'individu n'est qu'une partie d'un tout. Cette âme collective possède des caractères distincts de ceux de chacun des individus. Elle donne naissance à la foule dans toute sa singularité, diversité et complexité.

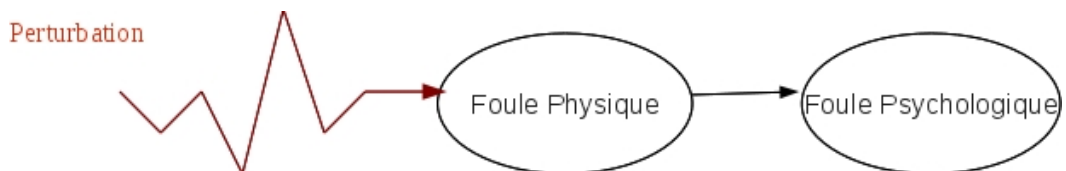


FIGURE 2.1: Illustration du processus de transition d'une foule physique à une foule psychologique.

1. Gustave Le Bon, « Le fait le plus frappant présenté par une foule psychologique est le suivant : quels que soient les individus qui la composent, quelque semblables ou dissemblables que puissent être leur genre de vie, leurs occupations, leur caractère ou leur intelligence, le seul fait qu'ils sont transformés en foule les dote d'une sorte d'âme collective. Cette âme les fait sentir, penser et agir d'une façon tout à fait différente de celle dont sentirait, penserait et agirait chacun d'eux isolément. » [70]

La transformation que subit une agglomération de piétons est un exemple intéressant pour observer le changement de structure dans une foule suite à une variation de l'environnement. Le cas d'une rue (figure 2.2(1)) montre qu'en l'absence de toute perturbation, les interactions entre les individus ne vont pas au delà d'une simple amélioration d'un confort de marche. Toutefois, une variation de l'environnement déclenche chez tous les piétons un sentiment de crainte et de danger. Les objectifs de chacun disparaissent au profit d'un objectif partagé tel que la fuite, même si la résolution s'avère très individuelle. L'individu se dissout dans le groupe, fusionne dans un tout et devient une simple partie. Cette fusion accentue les interactions dans le groupe et fait apparaître une dynamique collective qui repose sur le comportement des individus qui la composent. La foule psychologique se crée et fait émerger des comportements fondés sur une dynamique d'auto-organisation.

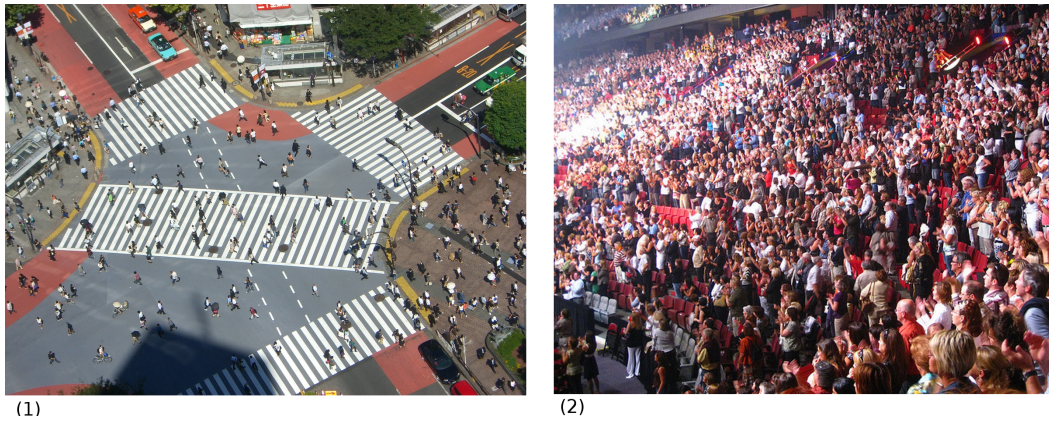


FIGURE 2.2: (1) Une foule physique de piétons dans un croisement. Les individus partagent un même lieu mais chacun a un objectif de déplacement différent. (2) Une foule d'individus dans un stade assistant à un concert. Ils partagent un même lieu et un même objectif, ils forment alors une foule psychologique(©flickr).

Le mécanisme de formation de la foule spontanée semble clair. Sa dynamique repose sur un processus d'interaction et d'auto-organisation. Elle fonctionne d'une manière décentralisée où chaque individu modifie son comportement sous l'influence de son voisinage. Par sa structure et sa dynamique la foule décrit la causalité circulaire d'un système complexe, en d'autres termes, la présence de rétroaction des comportements collectifs et des propriétés émergentes sur le comportement des éléments. La foule « psychologique » est donc un système complexe social. Sa dynamique fait surgir un important contraste entre les caractéristiques d'un individu et celles du groupe, en termes de décisions prises et de rapidité de traitement de l'information. En effet, les caractéristiques d'une foule sont loin d'être la somme des

2. La foule : éléments de compréhension

caractéristiques des individus qui la composent. C'est justement la mise en commun des aptitudes individuelles les plus ordinaires qui fait émerger les comportements dans une foule. Les actes sont généralement incontrôlables, la difficulté de les prévoir les rendent dangereux dans certaines circonstances. C'est pourquoi la compréhension de ce système passe par une étude des types de foule et de la nature des liens inter-individus.

Il est à noter que dans la suite de ce travail le terme foule, sauf précision contraire, désignera une foule psychologique sujet de notre étude.

2.2.2 Typologie de la foule

La diversité des foules réside dans la diversité des individus qui la composent, dans l'identité sociale qui les réunit et dans les comportements qui émergent de celle-ci. Il est important de prendre en compte cette disparité afin de mieux gérer les événements particuliers selon les caractéristiques de la foule. Cependant, peu de travaux dans la littérature ont été consacrés à l'étude de la typologie des foules. En 1967, Momboisse [[momboisse1967](#)] classe les foules en quatre types distincts : foule en fuite, foule avide, foule expressive et foule agressive. En 1995 Berlonghi [[11](#)] élargit cette typologie et propose onze types de foule selon la nature de l'évènement réunissant ses membres que nous répartissons dans deux grandes classes suivant l'état et/ou la constitution de la foule :

Classification de la foule selon son état

- Une foule en difficulté ou à mouvements limités : foule dont les mouvements sont restreints par manque d'espace libre par exemple. Le manque de mobilité peut demander une certaine planification préalable.
- Une foule expressive ou épanouie : foule impliquée dans un relâchement émotionnel tel qu'une célébration, des chants ou des danses.
- Une foule hostile : foule verbalement ou physiquement agressive. Ce type de foule est dangereux et susceptible de commettre des infractions.
- Une foule en fuite : foule qui fuit un danger réel ou imaginaire. Ce type de foule est redouté dans les catastrophes car les comportements sont imprévisibles et incontrôlables et amplifient souvent l'ampleur des catastrophes.
- Une foule dense ou étouffante : foule très dense, les individus perdent leurs facilités de déplacements et se trouvent emprisonnés dans la foule.
- Une foule pressée : foule dont le but est d'obtenir, d'acquérir ou de voler quelque chose. Ce type de foule inclut les foules de photographes ou des foules de voleurs, et cause généralement des dégâts humains et matériels considérables.
- Une foule violente : foule qui attaque et terrorise sans aucun respect des

normes sociales.

Classification de la foule selon sa constitution

- Une foule de piétons : foule en déplacement d'un endroit donné à un autre dans le but d'utiliser certaines facilités.
- Une foule de spectateurs : foule décentralisée qui réunit un ensemble d'individus hétérogènes pour observer un événement particulier.
- Une foule de participants : foule impliquée dans des activités liées à un événement particulier.
- Une foule de manifestants : foule hiérarchisée contrôlée par un leader et organisée pour un événement spécifique.

Selon Berlonghi, chaque événement rassemble des individus avec des convictions et des objectifs divers, ce qui les amène par conséquent à se comporter différemment devant une même perturbation. En situation de crise, par exemple, une foule de spectateurs se comporte de façon moins agressive qu'une foule violente. En effet, cette dernière est formée en ayant pour but de terroriser et d'attaquer un lieu, la crise ne fait que rajouter de la violence dans les comportements de ses individus, ce qui se reflète par la suite dans le comportement global de la foule.

Les deux classifications ainsi présentées se limitent à un seul critère de classification réduisant ainsi la définition d'une foule à seulement une dimension : son objectif. Or les études en science sociale et en psychologie nous montrent que de nombreux paramètres influencent l'évolution de la foule tels que la nature et le degré d'interaction entre les individus, la nature et la durée de la perturbation et la localisation de la foule. Classifier la foule sur le seul critère de « l'objectif » réduit la diversité des foules et fausse toute tentative de prédiction de ses mouvements.

La diversité des foules réside en particulier dans les nombreux éléments qui la constituent et dans le degré de dominance entre les individus les uns par rapport aux autres. Il est important dans ce cadre de tenir compte de tous ces éléments, et de proposer une typologie basée sur plusieurs dimensions. Dans cette optique de généralisation des critères de classification de la foule, le cabinet officiel du gouvernement Britannique [20] propose une typologie basée sur dix critères d'évaluation (figure 2.3) et de leurs degrés d'importance dans le comportement global exhibé.

Les dix critères sont les suivants :

1. L'objectif de la foule ;
2. La durée d'existence de la foule ;
3. Le temps de départ de l'événement ;
4. La localisation des individus lors de l'événement ;

2. La foule : éléments de compréhension

5. L'environnement général de l'événement et le degré des conflits ;
6. Le degré d'identification de l'individu à la foule ;
7. Le degré d'interaction entre les membres ;
8. Le degré d'hétérogénéité dans la foule ;
9. La taille de la foule ;
10. Le nombre de bagages emportés par chaque individu.

En se fondant sur le degré d'importance de ces diverses caractéristiques, cette typologie assure une meilleure identification de la nature et de la structure de la foule. Elle forme de ce fait une bonne base d'information pour les décideurs afin de mieux prévenir et anticiper les événements qui peuvent se produire.

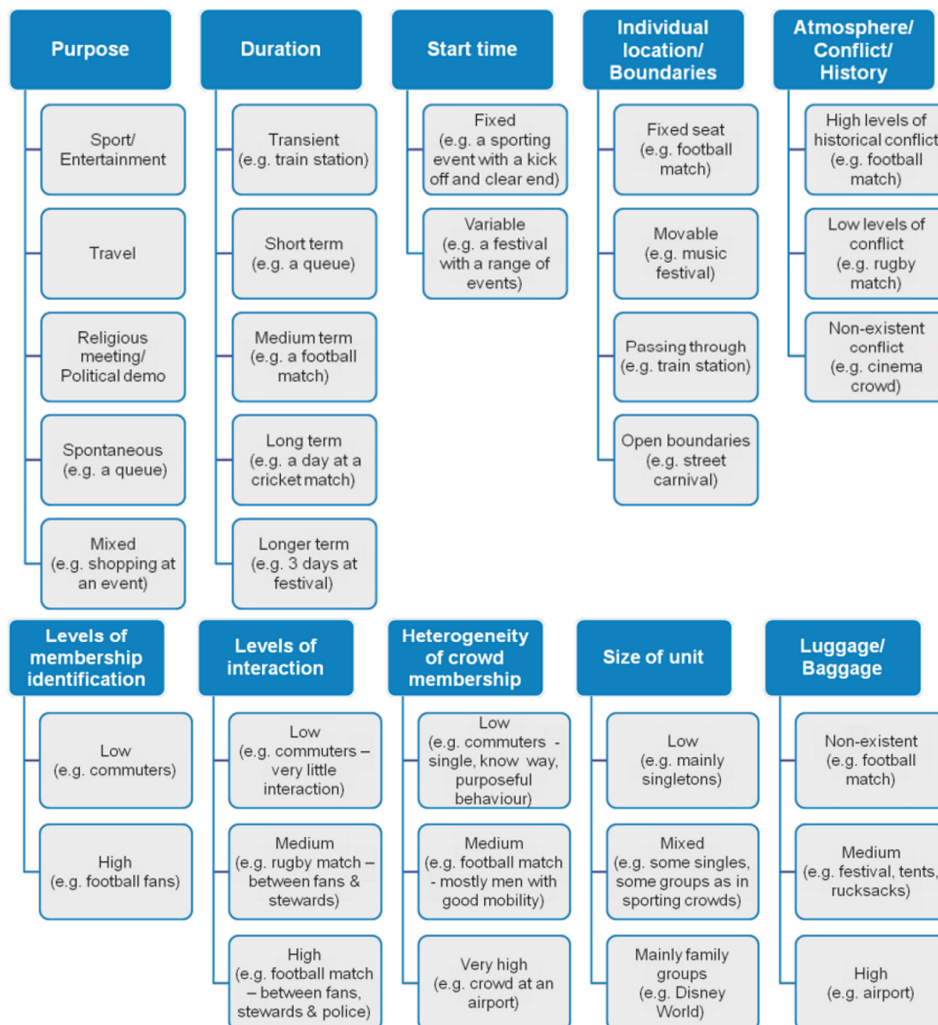


FIGURE 2.3: Une proposition de typologie de foule [20].

2.2.3 Les phénomènes d’auto-organisation dans les mouvements de foule

La foule présente des capacités d’organisation surprenantes allant de l’apparition d’une file d’attente devant un guichet à une coordination des tâches pour échapper à un danger. Tout comme dans les systèmes complexes, la dynamique collective de la foule génère de l’auto-organisation. Dans de tels systèmes, les individus s’organisent, coopèrent et entrent également en compétition sans centralisme et sans nécessité de planification. A ce stade, il est intéressant d’approfondir la no-

2. La foule : éléments de compréhension

tion d'auto-organisation et ses différents mécanismes afin de mieux comprendre son implication dans les mouvements de foule.

Auto-organisation

Les systèmes complexes manifestent des comportements et des capacités les constituant comme de véritables paradigmes de l'autonomie. Ils se régularisent, se stabilisent, s'auto-maintiennent, s'auto-produisent, modifient leurs comportements en fonction des variations de leur environnement. En d'autres termes, ils s'auto-organisent en faisant émerger des structures plus globales à partir des interconnexions d'unités simples. Au sens large, le terme d'auto-organisation désigne un ensemble de phénomènes dynamique de formation spontanée. Il s'agit d'un processus dans lequel, sous certaines conditions externes ou internes un système exhibe spontanément des formes d'organisation issues d'un ensemble d'unité en interaction. L'auto-organisation peut aller jusqu'à exprimer la capacité du système à « s'instituer » ou à « s'auto-constituer » en produisant un certain type d'action ou de comportement de par soi-même. Ainsi l'auto-organisation se caractérise par l'émergence des propriétés résultats des faits qui se produisent à un niveau microscopique, où un grand nombre d'entités interagissent localement produisant une propriété globale non linéaire, propriété qui se manifeste au niveau macroscopique.

Le terme d'auto-organisation est apparu pour la première fois en physique puis en chimie dans les années 1970 et 1980, pour décrire justement l'émergence de comportements au niveau macroscopique issus des interactions des entités au niveau microscopique. Depuis, divers domaines de recherche se sont emparés du phénomène : ainsi de nombreux travaux ont vu le jour en science sociale, en mathématique, en informatique ou encore en économie. Des modèles mathématiques précurseurs ont été construits pour étudier les systèmes auto-organisés de manière formelle tel que les travaux de Von Neumann [88] sur les automates cellulaires ou les travaux d'Alan Turing [128] sur la morphogénèse qui ont contribué à la mise en place de la théorie des systèmes auto-organisés. Proche de notre champs d'étude, citons également les travaux de Reynolds [105] qui montrent que des règles locales d'interactions entre les individus d'une population permettent l'émergence d'une coordination dans les déplacements, ainsi que les travaux de Schelling [113] sur le comportement complexe d'une société humaine et pour finir les travaux de Helbing [57] sur les déplacements de foules montrant l'influence des interactions inter-individus sur le comportement global de la foule.

Les mécanismes d'auto-organisation

Les interactions entre les entités d'un système sont à la base du mécanisme d'auto-organisation. Les interactions peuvent être indirectes selon le principe de stigmergie [51] pour les insectes sociaux ou principalement directes comme le cas d'une foule. En effet, dans le cas d'une foule, les individus interagissent entre eux de diverses manières (e.g visuelle, orale, gestuelle, tactiles par forces exercés etc.), ces interactions permettent un partage des informations et par conséquent la modification des comportements de l'individu. Cette variation au niveau local mène à des variations plus globales qui modifient par conséquent l'environnement général de la foule. La foule entre alors dans une boucle de rétroaction correspondant à la réaction du système à une entrée d'information.

Souvent appelée « *feedback* » la rétroaction se met en place quand les entités d'un système modifient leurs comportement sous l'influence de leurs voisinages. Elle peut être positive ou négative selon la nature des variations subies ainsi que le type de la foule. Une rétroaction positive tend à amplifier l'effet des variations, dans le cas d'une foule, le déclenchement d'un stimulus stimule chaque individu qui réagit avec son voisinage et modifie par conséquent son comportement. Cette réaction en chaîne entraîne une amplification continue du stimulus. Cependant, dans le cas d'une rétroaction négative le système tend à réduire les changements subis. Un système auto-organisé est régulé par le double mécanisme des rétroactions positives et des rétroactions négatives. Ces dernières viennent stabiliser le système dans un nouvel état ou le ramener dans sa trajectoire initiale. Dans une foule, la rétroaction négative tend à conduire à un retour des comportements à l'état initial ou à un nouvel état stable.

Les mouvements de foule

L'auto-organisation se traduit par une coordination des déplacements dans une foule. Des mouvements collectifs se forment, présentant des similarités avec les mouvements observés dans des populations animales tels que les nuées d'oiseaux ou les bancs de poissons. En effet, lorsque le stimulus subi par la foule est assez fort, l'objectif initial s'efface au détriment d'un nouvel objectif individuel mais identique à tout le collectif. Une cohésion apparaît au sein de la foule se traduisant par une orientation de tous les individus vers une même direction, la foule devient alors une seule unité en mouvement.

La foule manifeste de manière collective les sentiments de ses membres. Ainsi, sous l'influence d'un stimulus positif (e.g victoire, fête, etc.) cela rend ses mouvements plutôt calmes et ordonnés. Le mécanisme d'auto-organisation dans de telles situations se manifeste par la formation de lignes de déplacements (figure 2.4 (a))

2. La foule : éléments de compréhension

ou l'apparition des oscillations dans un passage étroit (figure 2.4 (b)).

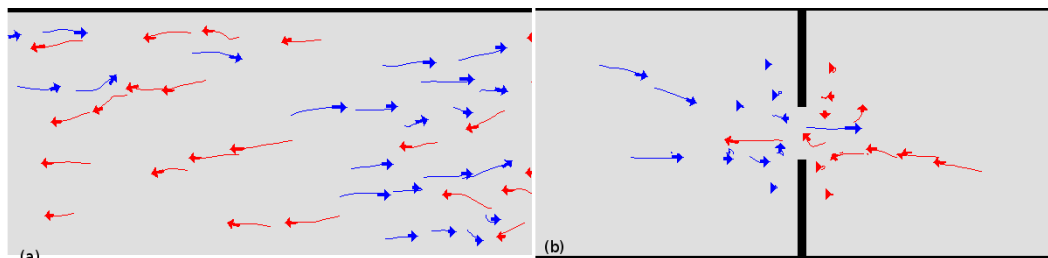


FIGURE 2.4: (a) Simulation montrant une formation de ligne de déplacement, (b) Simulation montrant une formation d'oscillations dans un passage étroit, l'occupation du passage varie dans le temps entre les deux flux de déplacement (©Dirk Helbing [57]).

Cependant sous l'influence d'un stimulus négatif de forte amplitude (e.g catastrophe naturelle, attentat, rumeur, etc.) la foule exprime de la peur, les mouvements deviennent désordonnés, rapides. Des comportements de groupe se créent tels qu'une formation d'arche au niveau des sorties étroites 2.5 (a) ou des phénomènes de prise en masse « *freezing by heating* » dans un couloir 2.5 (b). Encore plus dangereux des bousculades et des mouvements de panique peuvent apparaître, provoquant d'énormes pertes humaines et matérielles. Le tableau 2.1 répertorie une liste non exhaustive des mouvements de foule depuis 1896, ainsi que leurs conséquences dramatiques.

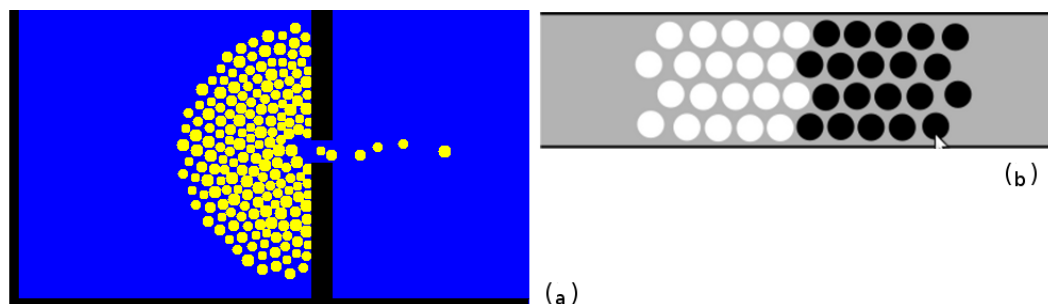


FIGURE 2.5: (a) Simulation montrant une formation d'arche au niveau de la sortie, (b) Simulation montrant l'apparition d'un phénomène de prise en masse d'après Dirk Helbing (©Dirk Helbing [57]).

Diverses causes déterminent l'apparition de ces comportements spéciaux et dangereux aux niveau des foules, et que les individus isolés ne possèdent pas. La première est que l'individu dans une foule a parfois des comportements qu'il n'aurait pas eu

sans la forme d’anonymat que propose la foule. La seconde cause est le phénomène de contagion qui intervient dans une foule, et qui provoque la propagation des comportements. L’individu devient alors plus fragile et sensible à la peur ressentie par son voisinage.

Une dernière cause dont la contagion n’est que l’effet, est l’apparition d’attitudes chez un individu tout à fait contraire à ceux de cet individu isolé. En effet, plongé dans une foule l’individu perd ses capacités et ses caractéristiques personnelles, il devient presque « hypnotisé » par la foule et perd une partie ou toute ses capacités de raisonner [70]. Le comportement de l’individu se limite alors à imiter le comportement des autres, ce qui dans de nombreuses situations est considéré comme un facteur amplificateur des catastrophes.

Les conséquences de ces spécificités comportementales sont loin d’être de faible importance. Elles entraînent la foule dans un désordre et une perte de coordination. Les comportements émergeant de coopérations et de coordinations observés lors d’un stimulus positif laissent place à des comportements de précipitation et de panique. Helbing [54] montre dans ses travaux une dégradation du temps d’évacuation dans une foule en panique, conséquence d’un manque de coopération entre les individus et d’une variation de l’intensité du flux d’évacuation. Il constate aussi que la présence du phénomène d’imitation provoque à son tour un déséquilibre dans l’utilisation des sorties. Ce déséquilibre est dû à l’effet de la rétroaction positive au sein de la foule, plus la sortie est utilisée, plus la probabilité est forte qu’un individu la découvre en imitant le comportement de son voisinage. Une congestion se forme autour de cette sortie alors que d’autres sorties restent inutilisées ou peu utilisées.

TABLE 2.1: Liste non exhaustive des mouvements de foule les plus dramatiques [137, 71, 62].

Événement	Date	Pays	Nombre de victimes	Nombre de blessés
Tragédie de Khodynka	Mai 1896	Empire Russe	1398 morts	1300 blessés
Mouvement de foule dans le stade Burnden Park	Mars 1946	Angleterre	33 morts	400 blessés
Panique dans le stade d’Estadio National	Mai 1964	Pérou	320 morts	800 blessés

2. La foule : éléments de compréhension

Événement	Date	Pays	Nombre de victimes	Nombre de blessés
Panique à kayseri	Septembre 1967	Turquie	40 morts	600 blessés
Panique dans le stade River Plate	Juin 1968	Argentine	80 morts	150 blessés
Mouvement de foule tragique dans le stade de Ibrox Park	Janvier 1971	Écosse	66 morts	200 blessés
Bousculade du Caire	Février 1974	Égypte	49 morts	47 blessés
Drame dans le stade Loujniki	Octobre 1982	Russie	66 morts	61 blessés
Drame de Heysel	Mai 1985	Belgique	39 morts	454 blessés
Tragédie de Hillsborough	Avril 1989	Angleterre	96 morts	766 blessés
Bousculade dans un tunnel de Mina	Juillet 1990	Arabie saoudite	1426 morts	
Bousculade du Hadj 1994	Mai 1994	Arabie saoudite	270 morts	
Mouvement de panique dans une église	Août 1994	République du Congo	150 morts	
Bousculade dans le stade Mateo Flores	Octobre 1996	Guatemala	84 morts	
Bousculade dans le métro de Minsk	Mai 1999	Biélorussie	54 morts	100 blessés
Drame du parc des expositions de Penfeld	Février 2002	France	5 morts	32 blessés
Bousculade du Hadj	En 2004	Arabie saoudite	249 morts	252 blessés
Mouvement de panique sur le pont du Tigre	Août 2005	Irak	100 morts	

2.3. Travaux d'étude et de modélisation des mouvements de foule

Événement	Date	Pays	Nombre de victimes	Nombre de blessés
Bousculade de Pasig	Février 2006	Philippines	73 morts	392 blessés
Drame du Stade Chililabombwe	Juin 2007	Zambie	12 morts	46 blessés
Bousculade dans le stade municipal de Butembo	Septembre 2008	République du Congo	13 morts	54 blessés
Bousculade dans un temple Hindou dans l'état du Rajasthan	Septembre 2008	Inde	113 morts	150 blessés
Bousculade de Dar es Salaam	Octobre 2008	Tanzanie	19 morts	16 blessés
Bousculade dans un temple Hindou de Prapatgarh	Mars 2010	Inde	63 morts	125 blessés
Bousculade de Duisbourg lors de la Love Parade	Juillet 2010	Allemagne	21 morts	511 blessés
Bousculade de Phnom Penh lors de l'Om Touk e	Novembre 2010	Cambodge	456 morts	400 blessés

Nous pouvons constater les conséquences dramatiques du comportement collectif dans les situations catastrophiques (tableau 2.1). La perturbation de la dynamique collective entraîne la perte de coordination entre les individus, la patience disparaît au profit du désordre et de l'impatience. L'apparition des comportements d'imitation accroît l'ampleur des perturbations et déséquilibre le flux d'évacuation. La foule se transforme alors en un piège pour les individus qui la composent.

2.3 Travaux d'étude et de modélisation des mouvements de foule

Pour pouvoir appréhender les systèmes complexes la modélisation et la simulation sont souvent indispensables. Concevoir un modèle revient à établir une représentation simplifiée du réel, la plupart du temps abstraite, comportant les caractéristiques et les propriétés essentielles. Les modèles que nous considérons sont

2. La foule : éléments de compréhension

dynamiques, la simulation les plonge alors dans le temps faisant évoluer les processus, permettant ainsi l'étude des phénomènes voire les contrôler en les favorisant ou les limitant. On entre dans une démarche de laboratoire virtuel.

Dans l'étude des mouvements de foule, la modélisation des comportements des individus doit pouvoir permettre de comprendre le mécanisme d'émergence des comportements collectifs auto-organisés et de prédire leurs apparitions afin de mieux les gérer. Nous proposons dans cette section un classement des modèles de mouvement de foule selon sept classes d'approches : approche fondée sur les automates cellulaires, approche fondée sur les gaz sur réseaux, approche fondée sur les forces sociales, approche fondée sur la dynamique des fluides, approche fondée sur les agents, approche fondée sur la théorie des jeux et approche fondée sur l'expérimentation sur les animaux. Nous présentons entre autre des exemples d'utilisation de ces approches dans la modélisation des flux d'évacuation que nous détaillons selon les six critères définis dans le tableau 2.2.

TABLE 2.2: Les six critères de description des modèles d'évacuation [142].

Critères	Descriptions
Approches	Sept approches de modélisation sont utilisées pour l'étude des évacuations de foule dans les situations de crise, utilisées séparément ou combinées, elles se fondent sur les Automates Cellulaires (AC), les gaz sur réseau <i>lattice gas</i> (GR), les forces sociales (FS), la dynamique des fluides (DF), les modèles à base d'agents (MBA), la théorie des jeux (TJ) et les expériences sur les animaux (EA).
Individus / Groupes	Selon les modèles (approches), les individus peuvent être modélisés comme des entités homogènes ou hétérogènes avec des propriétés différentes (e.g l'âge, la psychologie, le sexe, etc).

2.3. Travaux d'étude et de modélisation des mouvements de foule

Critères	Descriptions
Échelle / Granularité	La dynamique d'un système est modélisée selon une échelle microscopique lorsque les comportements collectifs émergent des interactions entre les individus du système (l'auto-organisation). Cependant, elle est modélisée selon une échelle macroscopique lorsque le modèle étudie les comportements du système en sa globalité.
Espace et le temps	Un modèle (approche) peut être à temps et espace discret ou continu.
Situation	Les modèles modélisent les mouvements de foule en situation normale comme en situation de crise.
Phénomènes observés	Les modèles d'évacuation reproduisent certains phénomènes observés dans la réalité.

2.3.1 Les modèles d'automates cellulaires

Les automates cellulaires ont été proposés initialement par Von Neumann. Ce sont des modèles de type microscopique, fondés sur une discrétisation du temps et de l'espace. L'environnement est représenté par des cellules de taille identique (figure 2.6) et il est formé en général d'une grille régulière. L'état d'une cellule peut être une valeur ou un vecteur de valeur et il évolue à chaque pas de temps en fonction de l'état des cellules voisines et l'ensemble de règles locale du système. La modélisation fondée sur les automates cellulaires est utilisée dans divers champs d'étude tels que l'informatique, la biologie, les mathématiques, ou encore la géographie. Cela constitue un modèle de système dynamique discret offrant un niveau de description très parcimonieux et présentant souvent des propriétés macroscopiques émergentes. Son utilisation est courante dans le cadre de la modélisation des systèmes complexes.

2. La foule : éléments de compréhension

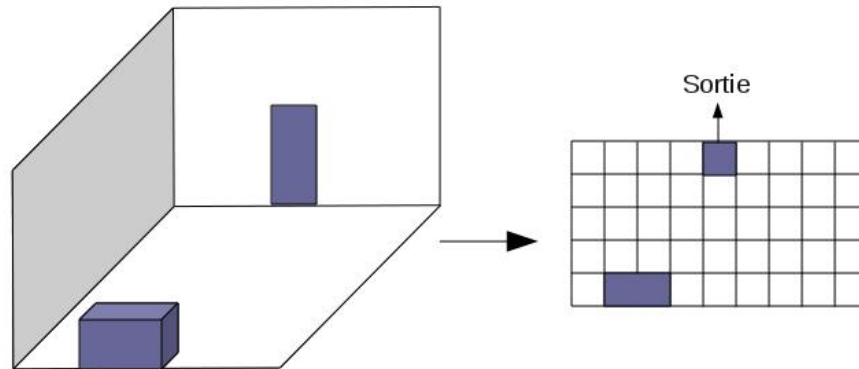


FIGURE 2.6: Discretisation d'une pièce en 3D en cellule de taille identique. L'obstacle et la porte sont représentés en bleu dans l'environnement 3D, ils sont représentés par les cellules bleu dans la grille, les cellules blanches représentent l'espace libre qui peut être occupé par les individus.

Au cours des dernières années de nombreux modèles fondés sur les automates cellulaires ont été développés pour décrire les mouvements d'évacuations de foule. L'espace est alors modélisé par une grille, où chaque cellule est soit vide soit occupée, les déplacements des individus sont formalisés par une série de règles. En général ces règles décrivent les conditions de passage d'un individu d'une cellule à une autre. Elles sont définies à partir des éléments du système modélisé, comme la direction et la vitesse de déplacement ou la présence d'obstacle. Les modèles à base d'automates cellulaires peuvent être classés soit selon le mode de déplacement choisi soit selon le mode d'interaction des individus. En effet, les déplacements des individus peuvent s'effectuer de deux façons différentes : soit les individus se déplacent les uns après les autres dans un ordre choisi aléatoirement (*Random Sequential Update*) formant un modèle asynchrone, soit les déplacements de tous les individus s'effectuent en même temps (*Parallel Update*) formant un modèle synchrone. Dans ces modèles synchrones les règles de déplacements règlent l'accès à une cellule lorsque plusieurs individus souhaitent l'occuper, ce qui gère par conséquent la concurrence. Le processus d'interaction dans les modèles d'automates cellulaires peut se restreindre à l'interaction entre les individus ou s'étendre à une interaction entre les individus et leur environnement.

Blue et Adler [14, 15] proposent un modèle bidirectionnel de déplacement d'une

2.3. Travaux d'étude et de modélisation des mouvements de foule

foule à base d'automate cellulaire CA-Ped. Les déplacements des individus suivent un ordre séquentiel ; cependant les déplacements ne s'effectuent qu'après la validation des déplacements de tous les individus de la grille créant ainsi un environnement parallèle de déplacement virtuel. Trois modes de déplacement sont modélisés dans CA-Ped : (a) flux de déplacement dans des lignes de directions séparés, (b) flux de déplacement dans des lignes dispersés et (c) flux de déplacement dynamique multi-lignes. Le modèle intègre entre autre la notion de vitesse de déplacement. L'individu n'est pas restreint dans son déplacement à l'une des cellules du voisinage, mais dépend de sa vitesse de déplacement qui peut être de 2, 3 ou 4 cellules. CA-Ped assure une modélisation simple et réaliste des déplacements des individus dans diverses situations à partir de simples règles de déplacement.

Une autre famille d'automates cellulaires est développée par Schadschneider et son équipe [19]. Les interactions dans ce modèle sont fondées sur le concept de *floor field* pour modifier les taux de transition vers les cellules voisines. Le modèle utilise une idée similaire à la notion de chimiotaxie² pour gérer les interactions, cependant, les individus suivent des traces virtuelles déposées dans l'environnement par les autres individus. On peut établir un parallèle fort avec le mécanisme de stigmergie décrit par Grassé en 1959 [51], qui est une méthode de communication indirecte des entités d'un système à travers l'environnement par l'intermédiaire de traces chimiques. L'espace est modélisé par une grille à deux dimensions où chaque cellule ne peut être occupée que par une seule personne. Chaque individu du modèle se déplace suivant une direction de préférence dans une matrice de préférence 3×3 (figure 2.7). La matrice de préférence contient les probabilités de déplacement de chaque individu dans les huit cellules voisines. Ces dernières sont proportionnelles à la vitesse de l'individu et à la position de la cellule.

2. La chimotaxie est l'un des types de taxies qui définit un déplacement orienté lié à un stimulus. C'est le phénomène par lequel les entités d'un organisme dirigent leurs mouvements en fonction de certaines espèces chimiques présentes dans l'environnement.

2. La foule : éléments de compréhension

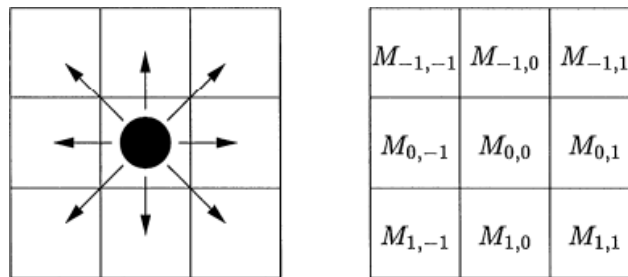


FIGURE 2.7: Les différentes possibilités de déplacement d'un individu et sa matrice de préférence $M = (M_{ij})$ [19].

Zhao *et al* [32] présentent en 2006 un modèle à deux dimensions pour l'étude de la dynamique des flux d'évacuation combinant l'approche fondée sur les automates cellulaires à celles de l'approche des forces sociales de Helbing que nous développons dans la section 2.3.4. Zhao étudie dans ce modèle l'influence de la taille et la position des sorties sur la dynamique d'évacuation.

Malgré la simplicité de leurs structures les automates cellulaires forment un outil rapide, facile et efficace pour la modélisation des systèmes complexes comme les mouvements de foule. Les modèles d'automates cellulaire ainsi présentés, même si certains sont une forme d'« agentification » des modèles d'automates cellulaires, produisent des phénomènes déjà observés dans la réalité comme la formation de files dans le trafic bidirectionnel ou l'apparition de congestion autour d'une sortie lors d'une évacuation. Ils forment ainsi une base de test et d'analyse dans l'étude du processus d'évacuation dans les situations de crise.

TABLE 2.3: Caractéristiques d'un ensemble de modèles basés sur les automates cellulaires.

Source	Approche	Individus Groupes	Échelles	Es- pace et temps	Situations	Phéno- mènes observés
[14]	AC	Homogènes	Microscopique	Discret	Normal	Formation de ligne de déplacement
[19]	AC	Homogènes	Microscopique	Discret	Évacuation	Comportement de groupe

2.3. Travaux d'étude et de modélisation des mouvements de foule

Source	Approche	Individus Groupes	Échelle	Espace et temps	Situations	Phéno- mènes observés
[32]	AC	Homogènes	Microscopique	Discret	Évacuation	Arche devant la sortie

2.3.2 Les modèles de gaz sur réseau (*Lattice gas model*)

Les modèles de gaz sur réseau sont souvent utilisés pour la simulation des systèmes de fluides et ont été généralisés en 1980 par Fredkin et Toffoli [44] et par Wolfram [138, 139]. Ils forment un cas particulier des modèles à base d'automates cellulaires. Le modèle est à temps et espace discret. L'environnement est représenté par une grille régulière dont les points d'intersection représentent des sites, et des particules actives se déplacent dans la grille. À chaque pas de temps l'état de chaque site varie en tenant compte de son état actuel et l'état des sites voisins. Un état est modélisé par un boolean indiquant par *vrai* la présence d'une particule dans le site et par *faux* l'absence de particule.

Les modèles de gaz sur réseau sont des modèles à marche aléatoire biaisée. Les individus sont modélisés par des particules actives comparables à des particules de gaz et elles sont dotées d'une certaine vélocité et possèdent toutes la même masse. Les déplacements de ces derniers sont gérés par deux processus à savoir un processus de propagation et un processus de collision :

- Pendant l'étape de propagation, chaque individu se déplace sur un site dans son voisinage selon sa vélocité.
- Pendant l'étape de collision, des règles permettent de gérer l'accès concurrent à un même site et de respecter les lois de conservation du nombre de particules, de la quantité de mouvement et d'énergie avant et après la collision.

Yamamoto *et al* [143] proposent un modèle appelé *real-coded cellular automata (RCA)* basé sur le modèle *real-coded lattice gas* pour simuler l'évacuation d'un espace en prenant en compte la vitesse des individus (équation 2.1). Le modèle se base sur une discrétisation du temps de Δ_t et de l'espace par une grille de cellules de taille identique Δ . Yamamoto propose une solution permettant de combler les limites de certains modèles qui restreignent les déplacements des individus à un voisinage de Von Neumann. En effet, la position d'un individu i à l'instant $(t+1)$ notée x'_i dépend de sa position à l'instant (t) et de sa vitesse notée respectivement x_i et v_i :

$$x'_i = x_i + v_i \quad (2.1)$$

2. La foule : éléments de compréhension

La vitesse d'un individu est représentée selon les deux directions x et y telle illustrée dans l'équation 2.2. Elle est divisée en deux parties $[v_i]$ qui correspond à la partie entière de la grille et $\{v_i\}$ qui correspond à la partie décimale inférieure à la longueur de la grille :

$$\begin{cases} v_{x,i} &= [v_{x,i}]\Delta/\Delta_t + \{v_{x,i}\}\Delta/\Delta_t, \\ v_{y,i} &= [v_{y,i}]\Delta/\Delta_t + \{v_{y,i}\}\Delta/\Delta_t \end{cases} \quad (2.2)$$

A ce stade de calcul, la position de l'individu x'_i à l'instant $(t + 1)$ peut être en dehors des cellules de la grille. Sa position sera alors corrigée et il sera positionné dans une cellule parmi les quatre cellules possibles A, B, C et D (figure 2.8) selon une certaine probabilité $p_A = \{v_{x,i}\} \cdot \{v_{y,i}\}$

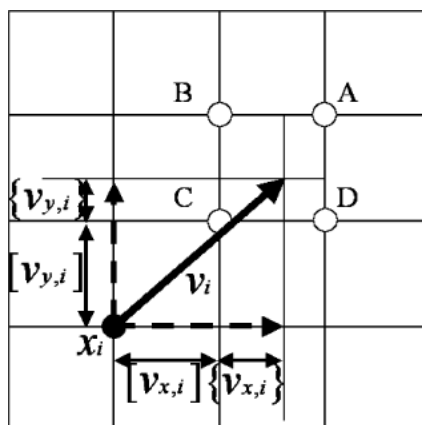


FIGURE 2.8: Position et déplacement d'un individu [143].

2.3. Travaux d'étude et de modélisation des mouvements de foule

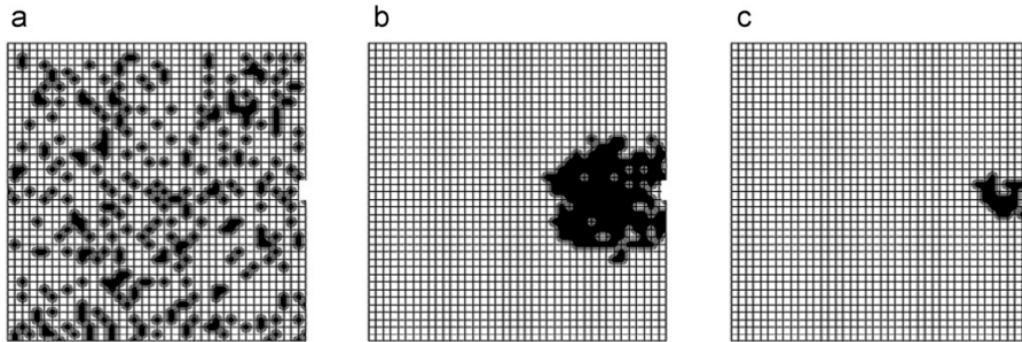


FIGURE 2.9: Simulation d'une évacuation dans une pièce avec une seule sortie à l'aide du modèle d'automate cellulaire proposé par Yamamoto et al. La figure représente trois étapes d'évacuation à trois instants différents : (a) $t = 0.5s$; (b) $t = 25s$ et (c) $t = 52.5s$.

Masahiro *et al* [77] proposent un modèle pour étudier les déplacements en diagonales des individus dans un couloir dans des situations normales et dans des situations critiques, Helbing *et al* [56] ont proposé quant à eux en 2003 un modèle fondé sur des grilles de gaz pour étudier une évacuation d'individus dans une pièce. Takimoto *et al* [126] présentent un modèle d'évacuation dans un couloir fondé sur le modèle de grille de gaz et montrent que le temps d'évacuation fournit une large distribution qui dépend de la position initiale de l'individu et de la taille de la sortie (figure 2.10).

2. La foule : éléments de compréhension

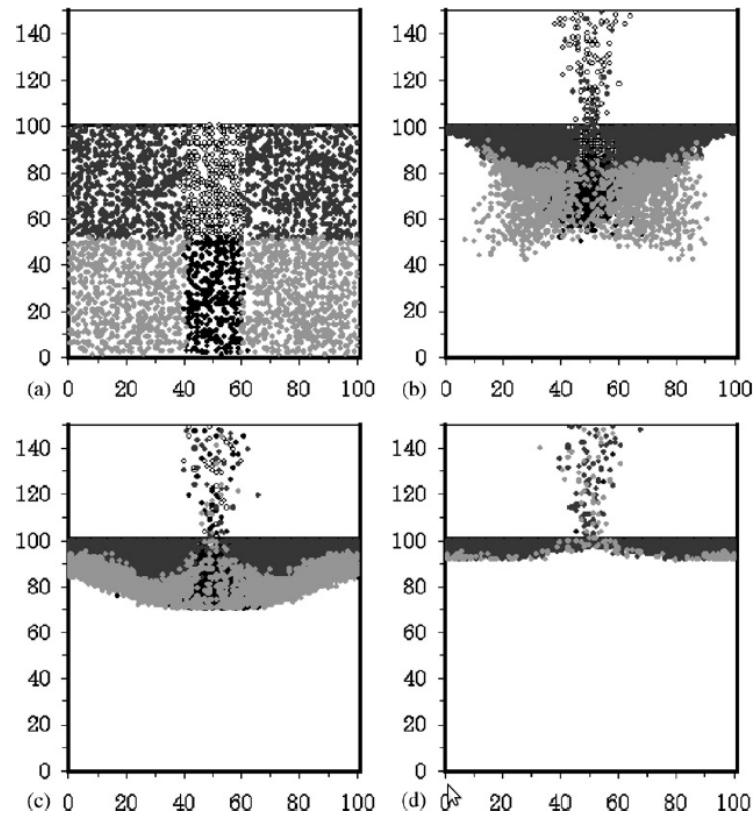


FIGURE 2.10: Les illustrations de (a)-(d) montrent l'évolution du flux d'évacuation selon le modèle de Takimoto à $t=0, 100, 300$ et 1500 , dans une pièce de taille $L = 100$ avec une seule sortie de largeur $W = 4$ et de densité initiale $p_s = 0.3$.

D'autres modèles à base de gaz sur réseau modélisent des processus d'évacuation sous différentes conditions critiques : le modèle de Nagai et al. [85] modélise un processus d'évacuation dans un lieu sombre et avec peu de sortie, Isoble *et al* [64] proposent une simulation d'évacuation à partir d'une pièce enfumée. Les modèles à base de gaz sur réseau peuvent être aussi combinés avec d'autres approches pour simuler des mouvements d'évacuation. Song *et al* [124] proposent un modèle multi-grille fondé sur le concept de forces sociales pour modéliser les interactions inter-individus et celles entre les individus et les obstacles de l'environnement.

TABLE 2.4: Caractéristiques d'un ensemble de modèles de grilles de gaz.

Source	Approche	Individus Groupes	Échelle	Es- pace et temps	Situations	Phéno- mènes observés
[56]	GR	Homogènes	Microscopique	Discret	Évacuation	Blocage et formation de file d'attente
[64]	GR	Homogènes	Microscopique	Discret	Évacuation	Blocage et comportement de groupe
[124]	GR et FS	Homogènes	Microscopique	Discret	Normal	Bousculade et formation d'arche
[126]	GR	Homogènes	Microscopique	Discret	Évacuation	-
[143]	AC et GR	Homogènes	Microscopique	Discret	Normal	Bousculade

2.3.3 Les modèles de la dynamique des fluides

L'approche de la dynamique des fluides propose une modélisation des individus similaire aux modèles de fluides et des gaz. Hederson [59, 58] stipule que le comportement des individus est similaire à celui des particules de gaz et de fluide et soutient ainsi l'hypothèse que les déplacements des piétons sont semblables à ceux des particules. Il présente un modèle à base d'équations différentielles partielles pour décrire la dynamique des déplacements des piétons. Bradley [17] utilise les équations de Navier-Stokes³ pour décrire la dynamique des déplacements d'une foule dense. Hugues [61] dérive dans son modèle les équations de déplacement bidirectionnelle d'une foule pour étudier le flux de déplacements en se basant sur des données issues d'observations des mouvements piétonnier. Colombo et Rossini [26] présentent un modèle continu de déplacement des piétons. Le modèle permet d'étudier la variation de flux de déplacement dans diverses situations telles que les situations de panique.

3. Les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivés partielles non linéaires permettant de décrire le mouvement de fluides « newtoniens » dans l'approximation des milieux continus[134]

2. La foule : éléments de compréhension

TABLE 2.5: Caractéristiques d'un ensemble de modèles de la dynamique de fluide.

Source	Approche	Individus Groupes	Échelle	Es- pace et temps	Situations	Phéno- mènes observés
[26]	DF	Homogènes	Macroscopique	Continu	Évacuation	Effet de compression
[61]	DF	Homogènes	Macroscopique	Continu	Normal	Comportement similaire à ceux des fluides

2.3.4 Les modèle de forces sociales

Une autre famille de modèle fondée sur les forces sociales a été introduite par Helbing en 1995 dans [55]. Le modèle se base sur l'approche de Hederson (section 2.3.3) et modélise ainsi les interactions inter-individus sous forme de forces. Helbing prend en compte les conséquences du phénomène d'auto-organisation pour expliquer l'émergence de comportement au sein d'une foule, tels que le phénomène d'alternance autour d'un rétrécissement et la formation de file de déplacement. L'intégration de l'auto-organisation a permis au modèle de se distinguer des modèles existants et d'être une des références dans la modélisation des flux d'évacuation dans diverses situations.

Contrairement aux approches précédentes ce modèle est à temps et espace continu. Les individus sont modélisés par des particules, leurs mouvements sont gérés par un ensemble de règles :

- Chaque individu cherche à joindre une destination particulière dans l'espace, ou une direction donnée.
- Chaque individu maintient une certaine distance de confort par rapport aux individus de son voisinage. C'est un rayon de confort et d'intimité.
- Chaque individu cherche aussi à garder une distance de confort par rapport aux obstacles fixes de son environnement.
- Chaque individu peut être attiré par des individus de son voisinage tels que des amis ou des membres de sa famille. Il préfère alors les suivre et cherche à maintenir une certaine distance de cohésion avec eux.
- Enfin, chaque individu essaye de maintenir une vitesse de déplacement proche de sa vitesse de marche préférée.

2.3. Travaux d'étude et de modélisation des mouvements de foule

L'ensemble de ces règles sont formalisées par des équations de force à l'image des forces exercées sur des particules de fluide ou de gaz. Néanmoins, ces forces sont des forces sociales qui tiennent compte des règles de déplacement propres à chaque piéton.

Un piéton i souhaite adapter sa vitesse de déplacement $v_i(t)$ à sa vitesse de déplacement désirée v_i^0 et à sa direction $e_i^0(t)$ avec un certain temps de "relaxation" τ_i . Ce qui se traduit par le calcul du terme d'accélération $[v_i(t)^0 e_i^0(t) - v_i(t)]/\tau_i$, tel que $v_i(t)^0 e_i^0(t)/\tau_i$ est un terme de déplacement et $-v_i(t)/\tau_i$ est un terme de frottement avec un coefficient de frottement égal à $1/\tau_i$.

Le modèle de force sociale se base sur le principe d'interaction entre les individus du système. Lors de ses déplacements, un piéton interagit avec ses voisins et les obstacles de son environnement. Il essaye d'une part, de garder une certaine distance de confort par rapport aux piétons de son voisinage, ce qui est modélisé par une force sociale de répulsion $f_{ij}^{soc}(t)$. D'autre part, il essaye de garder une certaine distance par rapport aux obstacles fixes de son environnement, modélisé par une force de répulsion $f_{ib}(t)$. Le modèle prend en compte le comportement d'attraction d'un individu aux membres de son groupe (e.g famille, amis, etc), traduit par une force d'attraction $f_{ij}^{att}(t)$, ainsi que son attirance à des points d'attraction de l'environnement tels que les issues de secours, les portes, les guichets représenté par une force sociale d'attraction aux objets fixes de l'environnement $f_{ik}^{att}(t)$. L'ensemble de ces forces décrivent le modèle de force sociale de déplacement d'un individu dans une situation normale :

$$f_i(t) = \frac{v_i(t)^0 e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j \neq i} [f_{ij}^{soc}(t) + f_{ij}^{att}(t) + \sum_b f_{ib}(t) + \sum_k f_{ik}^{att}(t)] \quad (2.3)$$

Dans des situations de panique une nouvelle force sociale nommé force physique d'interaction $f_{ij}^{ph}(t)$, vient s'ajouter à l'ensemble des forces dans l'équation 2.3 pour modéliser le contact physique entre les piétons (équation 2.4). Le modèle de Helbing a permis la reproduction de nombreux phénomènes tel que les phénomènes d'oscillations dans un passage étroit, la formation d'arche devant une sortie et le phénomène de "prise en masse" *freezing by heating*.

$$f_i(t) = \frac{v_i(t)^0 e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j \neq i} [f_{ij}^{soc}(t) + f_{ij}^{att}(t) + \sum_b f_{ib}(t) + \sum_k f_{ik}^{att}(t) + f_{ij}^{ph}(t)] \quad (2.4)$$

2. La foule : éléments de compréhension

L'approche de modélisation à base de force sociale a attiré l'attention de nombreux chercheurs. De nombreux modèles se sont développés proposant une adaptation du modèle de base, Zheng *et al* [146] présentent un modèle fondé sur le modèle de force sociale de Helbing et l'approche des réseaux de neurones pour modéliser le comportement d'une foule de piétons dans diverses situations. Parisi et Dorso [91] ont utilisé le modèle de force sociale de Helbing pour étudier la dynamique d'évacuation d'une pièce avec une seule sortie. Ils ont apporté ensuite des modifications à ce modèle de base pour simuler une évacuation d'une pièce dans une situation de panique. Moussaïd *et al* [83] proposent un modèle mathématique qui représente une évolution du modèle initial de force social de Helbing. A l'instar du modèle de Helbing, le modèle décrit les mouvements des individus par une combinaison de forces à savoir : une force de déplacement \vec{f}_i^0 qui définit le déplacement d'un individu selon une certaine direction et une certaine vitesse, une force de répulsion \vec{f}_{ij} qui décrit l'effet de l'interaction avec un individu j et une force de répulsion qui définit les interactions de l'individu avec des obstacles fixes de l'environnement \vec{f}_i^{wall} . Ils ont aussi introduit dans leur modèle une nouvelle force sociale pour décrire le comportement d'un individu i par rapport à un groupe d'individus \vec{f}_i^{groupe} . L'ensemble de ces forces décrivent l'équation de déplacement dans une situation normale :

$$\frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{f}_i^0 + \vec{f}_i^{wall} + \sum_j \vec{f}_{ij} + \vec{f}_i^{groupe} \quad (2.5)$$

Ce modèle mathématique permet d'analyser des résultats obtenus par les observations empiriques des déplacements des individus à savoir l'influence de la densité et la taille des groupes sur la vitesse des individus.

TABLE 2.6: Caractéristiques d'un ensemble de modèles de forces sociales.

Source	Approche	Individus Groupes	Échelle	Es- pace et temps	Situations	Phéno- mènes observés
[55]	FS	Homogènes	Microscopique	Continu	Normal et évacuation	Formation de ligne de déplacement, apparition de phénomène d'oscillation devant la sortie, de blocage, etc
[83]	FS	Homogènes	Microscopique	Continu	Normal	Décroissance linéaire de la vitesse de déplacement et une croissance de la taille des groupes
[91]	FS	Homogènes	Microscopique	Continu	Normal et évacuation	Mouvement de précipitation
[146]	FS	Homogènes	Microscopique	Continu	Évacuation	Blocage

2.3.5 Les modèles fondés sur les agents

L'individu est un acteur autonome, capable de raisonner et d'analyser son environnement afin de choisir les actions appropriées en fonction de ses objectifs, sa personnalité et ses motivations. Ces caractéristiques peuvent conduire à adopter une approche de modélisation, qui permet d'intégrer toutes ces spécificités dans le but de réaliser un modèle qui se rapproche au mieux à la réalité. L'approche à base d'agent semble être un outil idéal pour satisfaire ce type d'exigence. La caractéristique première de cette approche est de se fonder sur une représentation explicite de l'ensemble des individus du système ainsi que leurs interactions. L'individu est alors modélisé par un agent autonome capable de percevoir son environnement et de produire des actions résultant d'un processus de calcul pouvant éventuellement mo-

2. La foule : éléments de compréhension

délimiter un raisonnement. En se fondant sur une approche de modélisation ascendante qui vise à concevoir le système en partant des entités, la modélisation agent fournit des outils puissants pour l'étude et la compréhension des principes d'émergence des propriétés à partir des interactions entre les différentes entités du système étudié. Les modèles à base d'agent sont de plus en plus utilisés pour la modélisation des mouvements de foule dès lors que l'on cherche à modéliser des entités hétérogènes autonomes dotées de caractéristiques psychologiques et cognitives. Ils sont aussi de plus en plus hétérogènes quant à leur aspect de modélisation en faisant appel à d'autres approches ce qui rend leurs classifications difficiles.

Aladdin Ayyesh *et al* proposent dans leurs travaux de recherche un modèle agent pour la simulation des mouvements d'évacuations réalistes fondés sur la logique floue [12, 13]. Les individus sont ainsi modélisés par des agents autonomes capables de percevoir leurs environnements et de produire des comportements en tenant compte de leurs émotions ainsi que de leurs personnalités.

Zarboutis et Marmaras [144, 145] présentent un modèle à base d'agent pour simuler une évacuation de métro en cas d'incendie. L'espace est modélisé par une grille de cellule de taille identique, chaque cellule présente un objet de l'environnement tel qu'un couloir ou un train et peut contenir un ensemble fixe d'individus. Un individu est modélisé par un agent autonome, doté de comportements psychomoteurs lui permettant d'orienter ses choix de déplacement. L'agent admet aussi un champ de confort lui garantissant une certaine intimité et un champ d'influence dans lequel il peut interagir avec les autres entités de l'environnement. Zarboutis et Marmaras explorent dans ce modèle les conséquences des interactions entre les individus sur le flux d'évacuation.

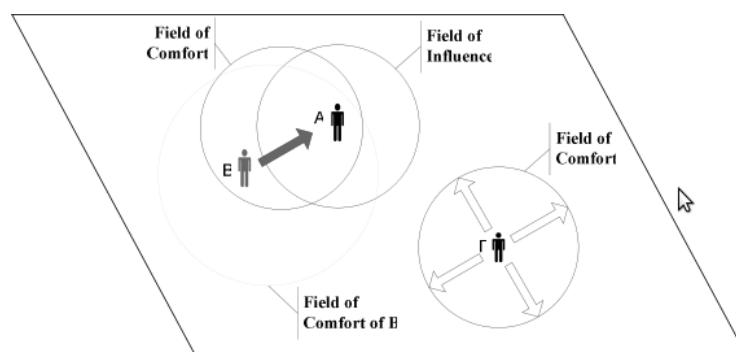


FIGURE 2.11: Agents avec leurs deux champs de confort et d'influence selon le modèle de Zarboutis [144].

2.3. Travaux d'étude et de modélisation des mouvements de foule

Pelechano présente en 2006 dans ses travaux de recherche [92] un modèle d'étude et d'analyse des mouvements de foules dense dans un environnement complexe, appelé modèle de force sociale modifié *High-Density Autonomous Crowd (HIDAC)*. Le modèle se base sur le modèle de force sociale de Helbing pour modéliser les propriétés physiques d'un individu et intègre entre autre ses propriétés psychologiques dans les équations de force sociale. En effet, fonder les comportements des agents sur les mêmes règles amène à l'apparition de comportements homogènes dans toute la foule. Un agent du modèle est dirigé dans ses déplacements par une force sociale f_{Total} , somme de l'ensemble des forces décrivant les interactions physiques et psychologiques avec les entités de l'environnement.

$$f_{Total} = f_{Attrac} * W_{Attract} + f_{Walls} * W_{Walls} + f_{Obst} * W_{Obst} + f_{desiredSpeed} + f_{OtherAgents} * W_{OtherAgents} + f_{FallenAgents} * W_{FallenAgents} \quad (2.6)$$

Dans cette expression, on a :

- f_{Attrac} : Force d'attraction vers un attracteur. Elle définit la direction que souhaite prendre un agent,
- f_{Walls} : Force de répulsion des murs,
- f_{Obst} : Force de répulsion des obstacles fixes de l'environnement autres que les murs,
- $f_{FallenAgents}$: Force de répulsion des autres agents qu'un agent risque de piétiner tels que des individus à terre,
- $f_{OtherAgents}$: Force de répulsion des autres agents qu'un agent peut contourner ou pousser selon les caractéristiques et objectifs de l'agent.

Enfin, $W_{Attract}$, W_{Walls} , W_{Obst} , $W_{OtherAgents}$ et $W_{FallenAgents}$ désignent l'influence de chaque force sur la force totale d'un agent.

En intégrant les caractéristiques psychologiques, physiques et géométriques, HIDAC assure une modélisation réaliste des mouvements de foules hétérogènes et une simulation des flux d'évacuations dans des situations normales et dans des situations de crise.

Stephania Bandini *et al* [9, 7, 8] proposent en 2007 une autre famille de modèle agent pour l'étude des mouvements de population qui dérive des principes des automates cellulaires, nommée modèle d'agent cellulaire situé *Situated Cellular Automata (SCA)*. L'espace est modélisé par un graphe de sites non orienté dont les nœuds représentent la localisation des piétons et les arcs représentent la relation d'adjacence entre les différents nœuds (figure 2.12). Les individus sont représentés par des agents cellulaires et possèdent des capacités de perception et de délibération.

2. La foule : éléments de compréhension

L'architecture d'un agent du modèle d'agent cellulaire situé est constituée par trois fonctions : perception, délibération et actions et par deux conteneurs d'informations ; une base de connaissance agent *Agent Knowledge Base (AKB)* qui contient la représentation interne de l'état de l'agent et de son environnement local et enfin un ensemble d'actions *Agent Action Set (AAS)* qui contient l'ensemble des actions réalisables par un agent. Le modèle d'agent cellulaire situé utilise la puissance de la notion d'agents et la simplicité de la notion des automates cellulaires pour faire apparaître des comportements émergeant issus des interactions entre un individus et les différentes entités de son environnement.

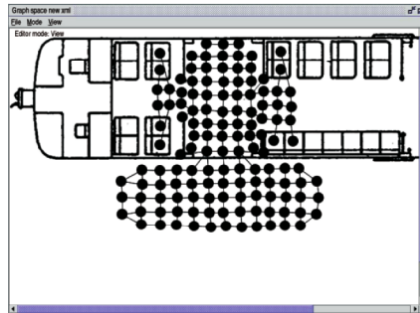


FIGURE 2.12: Discrétisation d'une portion de l'espace sous forme de graphe de sites non orientés [8].

2.3. Travaux d'étude et de modélisation des mouvements de foule

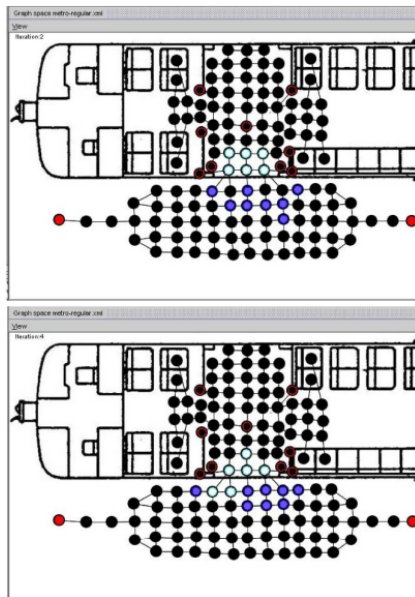


FIGURE 2.13: Deux aperçus écran du modèle d'agent cellulaire situé. Dans la première figure, les agents de couleur bleu clair se trouvent à l'intérieur du train et désirent sortir, alors que les individus de couleur bleu foncé situés de l'autre côté du wagon désirent entrer dans le train. Dans la deuxième figure la simulation montre l'évolution des mouvements des agents [8].

Pan *et al* [90] présentent une plate-forme basée sur l'approche agent pour simuler les comportements des individus dans des situations d'évacuation. Cette plate-forme propose un ensemble de méthode qui facilitent la construction d'un environnement artificiel et donc l'étude des processus d'apparition des comportements dans des situations critiques. L'individu est représenté par un agent cognitif autonome capable de percevoir son environnement et d'agir en conséquence. La prise en compte de l'aspect cognitif de l'individu a permis de rapprocher les simulations des mouvements d'évacuation à la réalité.

Fondé sur la plateforme de Pan MASSEgress est un outil de simulation qui permet de récupérer des comportements d'évacuation observables dans la réalité tel que des comportements de compétitions, la formation de queue devant une sortie voir même l'apparition de comportements grégaires. MASSEgress a été aussi utilisé comme un outil d'aide à la conception par les architectes, pour l'étude de l'emplacement des sorties de secours dans un bâtiment (figure 2.14).

2. La foule : éléments de compréhension

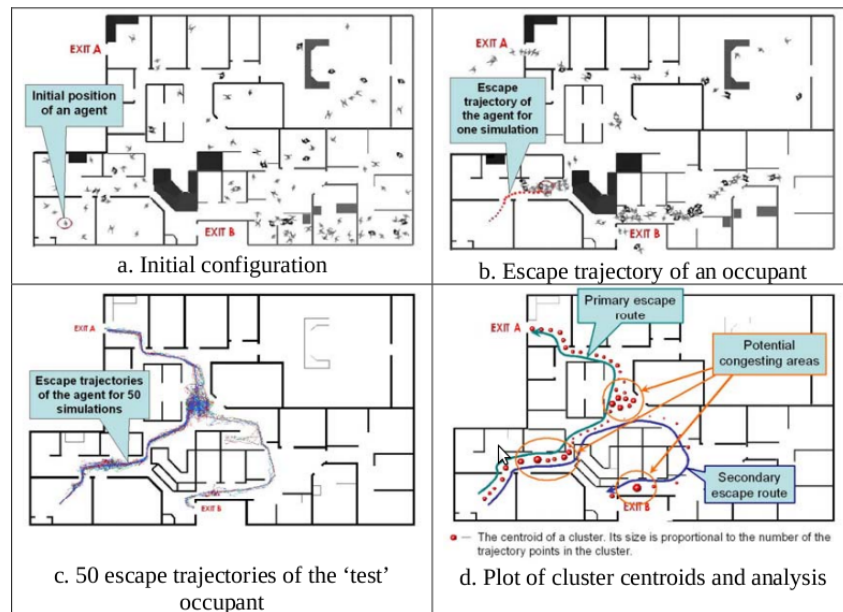


FIGURE 2.14: Simulation d'une évacuation avec l'outil MASSEgress d'un bâtiment sur deux étages disposant de deux issues de secours. Les figures montrent l'évolution du flux d'évacuation des individus au cours du temps; la figure (a) désigne la répartition initiale des individus dans le bâtiment, la figure (b) désigne la trajectoire du flux d'évacuation après une seule simulation, la figure (c) désigne l'évolution de la trajectoire d'évacuation après 50 simulations et la figure (d) est une analyse des différentes simulations montrant les potentiels points de congestion et les différents chemins que peuvent prendre les individus pour évacuer le bâtiment [90].

TABLE 2.7: Caractéristiques d'un ensemble de modèles agents.

Source	Approche	Individus Groupes	Échelle	Es- pace et temps	Situations	Phéno- mènes observés
[9]	MBA et AC	Hétérogènes	Microscopique	Continu	Normal	Comportement de compétition et de coopération

2.3. Travaux d'étude et de modélisation des mouvements de foule

Source	Approche	Individus Groupes	Échelle	Espace et temps	Situations	Phéno- mènes observés
[90]	MBA	Hétérogènes	Microscopique	Continu	Évacuation	Comportement de compétition, formation de file d'attente
[92]	MBA et FS	Hétérogènes	Microscopique	Continu	Normal et évacuation	Mouvement d'impatience, formation de file d'attente, bousculade et phénomène de propagation de la panique
[144]	MBA	Hétérogènes	Microscopique	Continu	Évacuation	Comportement basé sur un ensemble de règles comportemental

2.3.6 Les modèles de la théorie des jeux

Les modèles basés sur la théorie des jeux modélisent des systèmes complexes dont les entités admettent des comportements de compétition généralement. Une entité du système étudié est modélisée par un joueur qui interagit avec les différentes entités de son environnement. Chaque joueur du modèle admet des objectifs, il cherche alors à utiliser la stratégie qui maximise ses chances pour atteindre ses buts. Dans les mouvements de foule les comportements de compétition entre les individus lors d'une évacuation peuvent être interprétés par un modèle théorique des jeux [67]. Lo *et al* [73] présentent un modèle d'évacuation basé sur cette théorie pour étudier les comportements non coopératifs des individus et leurs influences sur le comportement global de la foule. Le modèle met l'accent sur le degré d'influence des interactions entre les évacués sur la dynamique d'évacuation. Kirchner *et al* [67] présentent un modèle d'évacuation d'urgence d'un avion en mettant l'accent sur le comportement de compétition et de coopération des individus. Les résultats de simulation du modèle vérifient les comportements observés dans divers cas d'évacuation d'avion.

2. La foule : éléments de compréhension

TABLE 2.8: Caractéristiques d'un ensemble de modèles de théorie des jeux.

Source	Approche	Individus Groupes	Échelle	Es- pace et temps	Situations	Phéno- mènes observés
[67]	TJ et AC	Homogènes	Microscopique	Discret	Évacuation	Évaluation du flux d'évacuation en fonction des comportements de coopération ou de compétition
[73]	TJ	Homogènes	Microscopique	Discret	Évacuation	Évaluation du choix de la sortie

2.3.7 Les modèles fondés sur les expériences sur les animaux

L'approche expérimentale est une approche qui vise à étudier le système en se fondant sur les données d'expérience en laboratoire et d'enregistrements vidéo. Cependant, cette approche est difficilement réalisable pour l'étude des flux d'évacuation en situation de panique d'une foule, pour des raisons éthiques, légales et par manque d'enregistrements disponibles sur des scènes de panique. Les modèles développés selon cette approche se basent sur les résultats des expériences réalisées sur les animaux sociaux et étendent par la suite les résultats sur la population humaine. Saloma *et al* [112] étudient la dynamique d'évacuation expérimentale sur des souris. L'expérience montre des souris paniquées dans un bassin d'eau qui se dirigent vers une sortie pour atteindre une plateforme sèche. Le modèle permet d'étudier l'influence de l'environnement sur les comportements des évacués. Altshuler *et al.* [2] présentent un modèle expérimental avec des fourmis pour étudier les comportements d'imitation dans des situations de panique. Les résultats de leurs expériences montrent que dans une situation d'évacuation, les évacués ont tendance à se suivre et donc certaines sorties se trouvent moins utilisées que d'autres.

2.3. Travaux d'étude et de modélisation des mouvements de foule

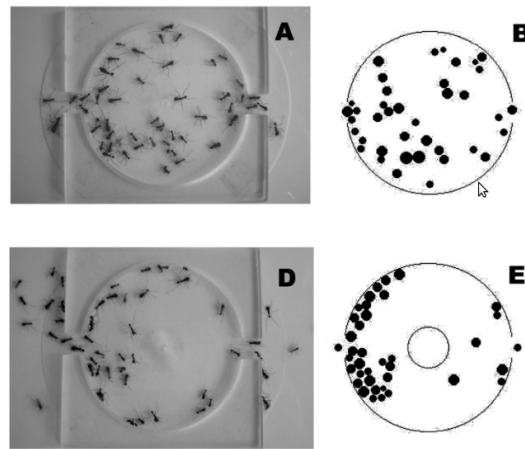


FIGURE 2.15: Expérimentations d'évacuation sur des fourmis dans un environnement contenant deux sorties positionnées symétriquement. La figure A présente un environnement sans perturbation la panique est donc absente. En revanche, la figure D présente un environnement avec perturbation (ajout de $50\mu\text{L}$ d'un produit répulsif), ce qui provoque chez les fourmis un comportement de panique. Les expériences montrent qu'en situation de panique les fourmis ont un comportement d'imitation, elles se suivent pour échapper aux dangers et donc exploitent une sortie plus qu'une autre [2]. Les figures B et E présentent les simulations informatiques des deux expériences.

TABLE 2.9: Caractéristiques d'un ensemble de modèles basés sur les expériences avec les animaux.

Source	Approche	Individus Groupes	Échelle	Es- pace et temps	Situations	Phéno- mènes observés
[2]	EA	Homogènes	Microscopique	continu	Évacuation	Auto- organisation, comporte- ment autonome en situation de panique

2. La foule : éléments de compréhension

Source	Approche	Individus Groupes	Échelle	Espace et temps	Situations	Phéno- mènes observés
[112]	EA	Homogènes	Microscopique	continu	Évacuation	Propagation de la panique, comporte- ment grégaire

2.4 Synthèse du chapitre

La modélisation des mouvements de foules admet un intérêt applicatif dans divers domaines. Ainsi elle peut permettre l'analyse de la sécurité des constructions avant leur implantation dans un environnement réel, le test des stratégies d'évacuation dans des situations de crise ou l'étude des comportements émergents résultats des interactions entre les individus. Comme nous venons de le voir, de nombreux modèles dans diverses disciplines ont été développés, de nombreux efforts ont été fournis pour étudier le comportement d'une foule dans une situation de crise afin de proposer des modèles qui permettent une simulation réaliste des flux d'évacuation.

Cependant, malgré la profusion des modèles de mouvements de foule, peu d'études s'attachent aux caractéristiques psychologiques et cognitives des entités modélisées. En effet, l'approche des automates cellulaires est une approche à temps et espace discret, la simplicité de son implémentation lui a valu sa popularité dans l'étude des systèmes complexe. Toutefois, cette approche présente des limites ; en effet les déplacements d'un individu sont restreint aux cellules de son voisinage et sont contrôlés par un ensemble de règles, ce qui réduit la liberté des mouvements des individus modélisés ainsi que la diversité de leurs actions. Les modèles des forces sociales quant à eux ont été développés pour palier les carences des précédentes approches, à savoir l'approche des automates cellulaires et l'approche de la dynamique des fluides, en introduisant une combinaison de forces issues de la physique newtonienne pour formaliser le comportement des piétons. Ces modèles de forces sociales fonctionnent dans un environnement continu, cependant la population demeure homogène avec une absence de détails psychologiques et cognitifs, au niveau des individus modélisés.

La plupart des modèles proposés (section 2.3) ne couvre pas l'ensemble des propriétés physiques et cognitives d'un individu. Ces modèles se fondent souvent soit sur la dimension physique à savoir la vitesse de déplacement ou la recherche du chemin, soit sur la dimension cognitive à savoir le comportement d'imitation, de contagion ou de coopération et de compétition (figure 2.16). Et si certains d'entre eux permettent la modélisation d'une population dense dans une situation normale,

ils échouent dans une situation de crise et inversement. En effet, l'étude des mouvements de foule va au delà d'une simple formalisation de règles de déplacements des individus ou de règles de cognition. Comme en témoigne la description des mouvements de foule dans la section 2.2.3, outre les facteurs physiques, des facteurs psychologiques influencent les décisions de l'individu. En effet, un individu interagit physiquement aux événements qui se déroulent dans son entourage, en s'éloignant d'une source de danger par exemple ou en se dirigeant vers une issue de secours en cas d'évacuation. En même temps, ce dernier interagit psychologiquement en exprimant de l'impatience, de la peur, de la coopération ou de la compétition. La modélisation de l'intégralité de ces propriétés permet d'appréhender les comportements de chaque individu et par conséquent le comportement de la foule entière.

2. La foule : éléments de compréhension

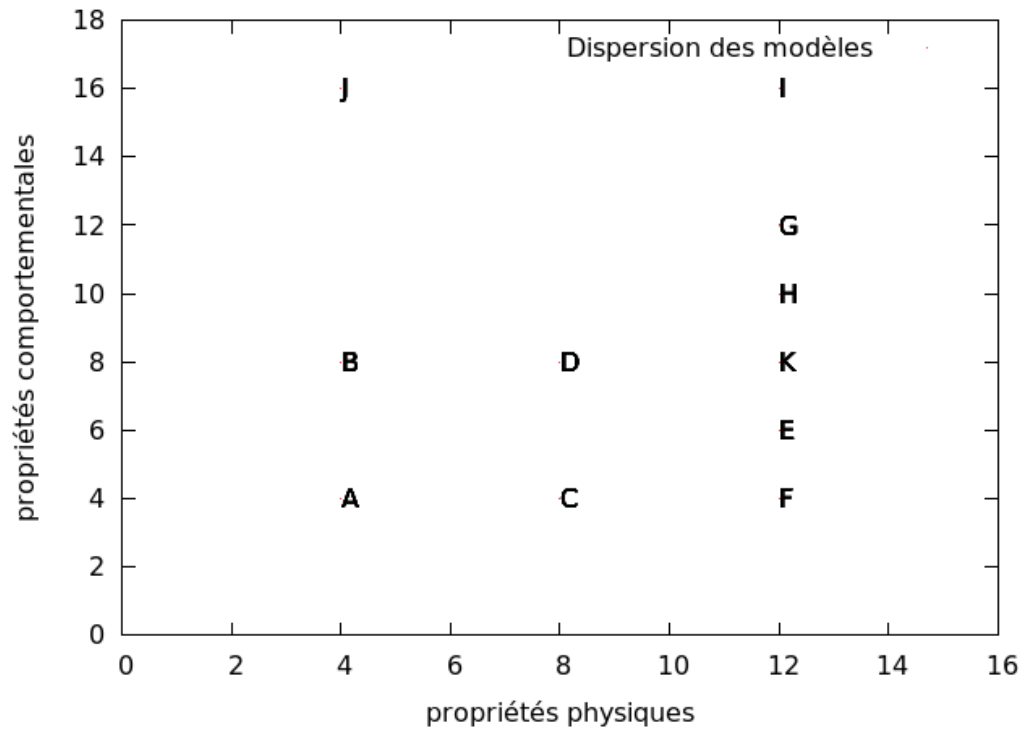


FIGURE 2.16: Dispersion de la prise en compte des propriétés physiques et comportementales des différentes approches de modélisation. Les propriétés physiques varient selon la modélisation de l'espace et le temps dans les approches étudiées, nous proposons une échelle allant de 4 jusqu'à 12 . Nous donnons la valeur 4 pour les approches dont l'espace et le temps sont discrets (e.g les modèles d'automates cellulaires), la valeur 8 pour les approches fondées sur les gaz sur réseaux dont l'espace et le temps sont discrets et elle vaut 12 pour les approches dont le temps et l'espace sont continus (e.g les modèles basés sur les agents). La propriété comportementale varie selon la prise en compte des caractéristiques cognitives et des propriétés psychologiques de l'individu, Nous proposons une échelle allant de 4 à 18 pour classer les propriétés comportementales des modèles étudiés dans la section 2.3.

Dans la figure 2.16, les modèles sont classés dans onze classes selon la modélisation des propriétés physiques et comportementales des individus :

- **A** désigne le modèle d'automates cellulaires : [14].
- **B** désigne les modèles d'automates cellulaires : [19, 32].
- **C** désigne les modèles de grilles de gaz : [56, 64, 126, 143].
- **D** désigne le modèle de grilles de gaz : [124].
- **E** désigne le modèle de la dynamique de fluide : [61].

- **F** désigne le modèle de la dynamique de fluide : [26].
- **G** désigne le modèle de la dynamique de forces sociales : [146]
- **H** désigne le modèle de la dynamique de forces sociales : [83]
- **I** désigne le modèle basés sur les agents : [9, 90, 92, 144] et les modèles basés sur les expériences avec les animaux [2, 112].
- **J** désigne le modèle de la théorie des jeux : [73, 67].
- **K** désigne le modèle de force sociale : [55, 91] .

Les modèles à base d'agent semblent être les mieux appropriés pour répondre aux exigences de la modélisation des mouvements de foule en situation normale et aussi en situation de crise. En bénéficiant des recherches en science cognitive [50], l'approche agent permet une intégration plus facile des propriétés psychologiques et sociales de l'individu, ce qui assure une description plus réaliste de la foule dans sa totalité. Au delà de la perspective de modélisation réaliste des individus virtuels, l'approche agent contribue au développement de l'idée de laboratoire virtuel. Il s'agit de pouvoir construire un modèle du « monde » et d'observer sa dynamique à travers des indicateurs élaborés selon les mêmes protocoles que ceux utilisés pour observer le monde. C'est dans ce cadre de modélisation réaliste du monde que se situe notre travail. Nous adoptons pour cela l'approche agent pour la modélisation des individus et leurs mouvements dans le contexte d'une situation de panique en intégrant certaines propriétés psychologiques et sociales.

Les comportements dans le cadre d'une évacuation

3.1	Introduction	51
3.2	Aspects psychologiques relatifs à l'évacuation	52
3.2.1	La panique	52
3.2.2	Perception de l'environnement	57
3.2.3	Orientation spatiale	58
3.2.4	Degré d'organisation de l'évacuation	59
3.2.5	Synthèse	59
3.3	Modélisation cognitive des comportements	60
3.3.1	Le processus de prise de décision	60
3.3.2	Les modèles décisionnels	62
3.3.3	La structure cognitive de l'individu et la prise de décision	64
3.4	Le comportement humain durant une catastrophe et ses conséquences sur la mobilité	70
3.4.1	Études du comportement de l'individu durant l'évacuation	70
3.4.2	Modèles comportementaux	73
3.5	Synthèse du chapitre	75

3.1 Introduction

L'évolution de la société s'est accompagnée du développement des grandes métropoles et de l'expansion des constructions abritant des groupements de plus en plus importants d'individus. Ces lieux de concentration présentent un danger potentiel dont la dangerosité varie d'une situation à une autre. De nombreux incidents ont été enregistrés au cours de ces derniers siècles, notamment dans les stades, les salles de spectacles ou les lieux de pèlerinages religieux. Les études psychologiques et sociales ont montré le lien étroit entre les problèmes d'évacuation et plusieurs aspects comportementaux. En effet l'être humain est une entité complexe où plusieurs facteurs d'ordre psychologique déterminent son comportement. Cette complexité conditionne

3. Les comportements dans le cadre d'une évacuation

l'attitude individuelle face à divers problèmes, ce qui affecte par conséquent le collectif, et peut conduire également, dans des situations d'évacuation, à l'émergence d'un dangereux phénomène psychologique qui est : « la panique ».

La panique est en effet un phénomène complexe, souvent évoqué pour des situations de crise et d'évacuation impliquant un nombre élevé de personnes et elle conduit à une rupture de la stabilité d'une foule et favorise l'apparition des débordements catastrophiques. Certes, ce n'est pas le seul aspect de l'évacuation où des aspects d'ordre psychologique viennent perturber le flux de mouvement de la foule. D'autres aspects contrarient également de manière significative le processus d'évacuation en situation de crise, mais la panique demeure le phénomène le plus redouté dans de telles situations.

Notre travail se place dans ce cadre particulier des évacuations de foule durant lesquelles des phénomènes de panique peuvent survenir. Ce chapitre est consacré à l'étude de l'émotion de la foule dans le contexte d'une évacuation. Nous présentons dans la première partie une définition de la panique suivant deux écoles de pensée selon Dupuy [37] : l'école française et l'école américaine, puis nous introduisons quelques autres paramètres qui jouent un rôle important dans le déroulement d'un processus d'évacuation. La seconde partie du chapitre est dédiée à la présentation des travaux de modélisation de l'émotion. C'est une partie très importante dans notre travail, car elle nous fournit des outils d'approche et de modélisation de l'émotion de l'individu dans diverses situations et surtout en situation de crise.

3.2 Aspects psychologiques relatifs à l'évacuation

3.2.1 La panique

Dans la mythologie grecque la panique explique l'effondrement soudain de l'ordre social. Les individus se figent sur place ou au contraire se lancent dans des fuites incohérentes. Dans le mythe la cause de ce désordre est Pan, dieu des bergers, mi-homme, mi-bouc, monstre et séducteur à la fois. Les Grecs faisaient de Pan la cause de tout débordement. Pan n'existe plus dans les croyances de nos jours, cependant la panique est toujours présente. Par qui Pan a-t-il été remplacé alors ?

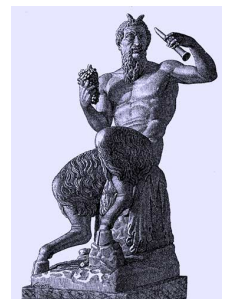


FIGURE 3.1:
Le dieu
Pan.

La panique est un phénomène généralement étudié en psychologie et en science humaine et souvent identifié par ses conséquences, à savoir le désordre social et la

perte de cohésion d'un rassemblement d'individus. Elle est évoquée à chaque fois qu'une situation de tension s'aggrave, dérape ou échappe au contrôle humain. Selon Damienne Provitolo la panique est un effet de dominos ou effet d'entraînement « original » [97, 98], résultat de l'interprétation subjective des individus de la dangerosité de la perturbation perçue. La panique se développe ainsi chez l'individu puis se propage dans la population entière par les effets en chaîne tel qu'un « tremblement de terre qui déclenche une cascade d'effets induits » selon les termes de l'auteur dans [98]. La panique est donc une menace non prévisible et non contrôlable qui survient spontanément et fait basculer les choses dans le désordre total.

Néanmoins des divergences existent dans la définition du processus de déclenchement de la panique et sa relation avec la catastrophe. Cette divergence donne lieu à diverses approches [102] :

- Une approche qui découle de la mythologie grec du dieu Pan, dans laquelle la panique désigne une peur soudaine et incontrôlable ;
- Une approche qui définit la panique par le comportement de fuite des individus en réponse à un danger imminent ;
- Une approche mixte soutenue par certains auteurs tel que Smesler [120] et qui regroupe les deux précédentes approches. La panique est ainsi définie comme « une fuite collective basée sur des comportements hystériques ».

Les divergences sur la notion de panique ne s'arrêtent pas à la simple différence dans l'identification de sa nature. Diverses discussions ont donné lieu à deux grands thèmes de recherche. Le premier thème concerne la nature des comportements en situation de panique, certains préconisent la notion d'irrationalité pour identifier les attitudes des individus d'autres préfèrent parler de rationalité limitée. Le deuxième thème concerne en particulier le mécanisme de contagion de la panique. En effet, les avis divergent sur ce point, si de nombreux travaux supposent que la panique se propage par contamination, en d'autres termes imitation des comportements du voisinage. D'autres estiment que les mouvements de panique générale sont le résultat des interactions entre les individus.

Ces importantes divergences ont donné naissance à deux grandes écoles à savoir l'école Française et l'école Américaine. Nous détaillons dans les sections suivantes l'approche de chacune des deux écoles.

La panique dans l'école Américaine

Aux États Unis la panique est étudiée au sein de centre de recherche universitaires spécialisés dans l'étude des catastrophes. Le plus important d'entre eux a été créé en 1963 à l'université d'État de l'Ohio par E. L. Quarantelli. Il s'agit du Disaster Research Center, abrité aujourd'hui par l'université de Delaware. L'école

3. Les comportements dans le cadre d'une évacuation

Américaine concède l'existence de la panique, cependant elle considère qu'aucun lien direct n'existe entre une catastrophe et la panique. Selon cette école le public et les pouvoirs publics alimentent ce rapprochement entre la panique et les catastrophes, alors qu'aucune causalité n'existe entre les deux phénomènes. En effet, l'école Américaine soutient deux hypothèses :

- La panique est moins irrationnelle et sauvage que le mythe ;
- La panique est peu présente dans les situations de catastrophes.

La panique se traduit dans une foule par une variation des comportements, avec une « désintégration des normes sociales » et une « destruction des liens primaires les plus forts » [103]. De nombreux exemples montrent, en effet, des masses humaines se piétiner et s'écraser dans des couloirs étroits pour s'échapper au feu, des fuites de parents de la maison en flamme abandonnant leurs enfants, des bousculades. Cependant, d'autres exemples de catastrophe montrent aussi l'énorme capacité d'une foule à s'organiser et à s'entraider dans ces moments de crise. Une étude anglaise affirme que sur mille incendies de forêt étudiés, la majorité des individus adoptent un comportement approprié et seulement 5% des individus adoptent un comportement jugé augmenter le risque de panique [100]. L'attaque terroriste du 11 Septembre 2001, qui a conduit à l'écroulement des tours jumelles du World Trade Center montre aussi une absence totale de panique.

La panique semble être alors extrêmement rare, les récits anecdotiques sont alimentés par l'imaginaire des individus non concernés par l'événement. Selon l'approche Américaine, une partie du problème concerne l'angle d'analyse des comportements des individus en cas de crise : « le problème est que souvent le comportement sous une certaine tension est comparé à un comportement idéal et non à un comportement quotidien ». Évidemment, en situation critique il ne faut pas s'attendre à ce que les individus réagissent de façon optimale. Il est tout à fait normal d'observer certains comportements non adéquats, mais ces derniers sont des solutions envisageables parmi d'autres. L'école Américaine définit ces comportements d'asociaux, non-rationnels plutôt que irrationnels et « antisociaux » [99]. La panique n'induit pas alors à l'individualisation et à la régression des comportements au niveau animal. L'individu perd certes certaines de ces capacités mais garde éventuellement une certaine lucidité. Quarantelli s'appuie sur le concept de « rationalité limitée » utilisé en sociologie et en micro-économie pour justifier ses propos. Il suppose qu'en situation de catastrophe l'individu opte toujours pour une décision rationnelle mais cette rationalité est limitée, dès lors qu'il s'arrête au premier choix qu'il estime satisfaisant. Ce comportement agrégé à ceux des autres justifie les débordements collectifs désastreux.

3.2. Aspects psychologiques relatifs à l'évacuation

L'école Américaine dresse une spécification complète sur les mécanismes de déclenchement et de propagation de la panique. Elle spécifie deux conditions de déclenchement de la panique dans une situation de crise : les conditions contextuelles et les conditions immédiates.

Les conditions contextuelles : la première condition découle de la psychologie qui estime que « les individus paniquent dans les situations qui sont identifiées verbalement comme des situations effrayantes et terrifiantes » [72]. Selon cette hypothèse, le risque de panique augmente lorsque les individus possèdent une connaissance des conséquences d'une catastrophe donnée. La deuxième condition d'un déclenchement de la panique est l'absence des liens sociaux entre les individus. En effet, lors d'une crise les liens sociaux d'une foule se brisent augmentant le risque de prendre des décisions non adéquates. Selon un témoignage rapporté dans [66] une personne affirme que la présence de son jeune fils l'a empêchée de suivre les individus qui criaient et courraient dans tout les sens.

Les conditions immédiates : la panique se déclenche sous trois conditions à savoir : la perception d'un danger potentiel, le sentiment d'impuissance face à la nouvelle situation et la rupture des liens sociaux dans la foule. En effet, lorsque l'individu perçoit un danger et estime qu'il est pris au piège, il panique et trouve dans la fuite la solution lui permettant d'échapper au danger. Cependant, la fuite n'est pas toujours observable dans les situations de crise car si aucune solution de sortie ne se présente pour l'individu, ce dernier ne fuit pas et reste calme conscient que le danger est inévitable.

L'école Américaine admet une vision de la panique moins catastrophique que ce que partage la société. Deux points de divergence se dégagent ; la catastrophe n'est pas synonyme de panique et les décisions sous l'influence de la panique admettent une part de rationalité. L'école Française admet une vision plus proche du mythe de la panique sans nier que la panique en situation de catastrophe est un phénomène rare.

La panique dans l'école Française

Dans son livre [30] L. Crocq définit la panique comme :

"Une peur intense, ressentie simultanément par tous les individus d'une population, caractérisé par la régression des consciences à un niveau archaïque, impulsif et grégaire, et se traduisant par des réactions primitives de fuite éperdue, d'agitation désordonnée, de violence ou de suicide collectif."

3. Les comportements dans le cadre d'une évacuation

Selon L. Crocq la panique entraîne une perte de toutes capacités de raisonnement, de rationalité et une disparition des liens sociaux et de toutes dispositions affectives. Le Bon partage cette définition de la panique, et identifie dans son ouvrage, *Psychologie des foules* [70], l'état mental de la panique, par une dissolution des consciences individuelles dans un grand tout « l'âme collective de la foule ».

Nous sommes ici face à l'approche Française de la panique, qui découle directement de la psychologie des foules. L'âme collective de la foule permet de rassembler tous les individus autour d'une même orientation et un même sentiment. La fusion de l'individu avec la foule fait surgir des caractères spéciaux que l'individu seul ne possède pas. C'est dans cette fusion que l'individu perd tout sens critique, ses aptitudes intellectuelles, sa rationalité et cède à des instincts que, seul, il aurait forcément réfrénés. C'est effectivement cette régression collective, « cet anonymat irresponsable, ce sentiment illimité de puissance » [28] qui provoque l'apparition de la panique dans une foule.

L. Crocq dresse une définition complète de la dynamique de la panique collective : il existe d'abord « une phase de préparation durant laquelle monte l'inquiétude et circule la rumeur. Il s'ensuit une phase de choc, un signal ayant été perçu, point de départ de la désorganisation psychique. On observe alors une phase de réaction, qui signe la propagation en masse, la contagion des comportements à l'ensemble de la foule. Enfin vient une phase de sédation, marquée par l'épuisement physique, l'épuisement émotionnel et le retour progressif à la lucidité ». Le Bon à son tour appuie cette approche et stipule que le phénomène de panique est d'ordre « hypnotique ». Par le fait que l'individu constitue une partie d'un tout, il devient influençable, « un automate que sa volonté ne guide plus » [70]. La panique peut être assimilée à un ensemble de réactions de stress entraînant des mouvements d'imitation d'abord moteurs, puis mentaux. L'individu dans une foule présente une partie d'un tout, ses limites se confondent avec celles des autres. Il devient alors une cible facile à manipuler et à diriger.

C'est ainsi que l'école Française identifie « l'état mental » de la panique, or une autre expression existe « la psychologie de la panique » [37]. Il est à noter qu'une divergence existe entre les deux notions. En effet, selon la notion d'état mental, la panique apparaît comme la formation d'un nouvel être provisoire formé d'individus soudés, alors qu'elle apparaît selon la psychologie de la panique comme un processus d'individualisation. L'école Française ne détaille malheureusement pas cette opposition, elle se contente seulement d'exposer les deux. N'étant pas spécialiste du domaine, nous ne attarderons pas sur cette divergence, nous nous contenterons de la définition de la notion de l'état mental.

Synthèse des deux approches

La panique est un phénomène exceptionnel, elle joue un rôle important dans l'imaginaire de la société, c'est automatiquement ce que l'on évoque dans les crises dès que la situation échappe au contrôle humain. De nombreux travaux s'emparent du phénomène ce qui nourrit la fascination autour de la panique. Ainsi, deux grandes écoles se distinguent l'école Américaine et l'école Française. Certaines divergences apparaissent entre les deux approches essentiellement au niveau du processus d'apparition de la panique et au niveau de son principe de propagation (tableau 3.1).

TABLE 3.1: Points de divergences sur la notion de la panique entre l'approche Américaine et l'approche Française.

Approche Américaine	Approche Française
Rationalité limitée	Irrationalité
Propagation de la panique par imitation rationnelle	Propagation de la panique par imitation irrationnelle
Les catastrophes ne sont pas synonyme de panique	La panique est indissociable des catastrophes

Néanmoins, les deux approches se rejoignent sur des points importants :

- La panique est un sentiment de peur extrême qui envahit l'individu suite à la perception d'un éventuel danger ;
- L'interaction sociale dans une foule favorise la propagation de la panique.

L'amorce de la panique demeure un risque dans une foule. Le désordre social qu'elle peut provoquer est souvent plus catastrophique que la catastrophe en elle même. Étudier et modéliser ce phénomène est important, la réussite de cet objectif doit permettre d'anticiper et de gérer des situations de crise.

3.2.2 Perception de l'environnement

La perception de l'environnement est un paramètre fondamental dans le comportement humain, particulièrement en situation d'évacuation. Grâce à son sens olfactif, auditif et visuel, un individu réagit aux événements qui se déroulent dans son entourage et agit en conséquence. Pendant une évacuation d'un édifice ou durant une catastrophe naturelle par exemple, un individu est amené à agir rapidement face au danger et à reconnaître les éléments qui permettent de trouver le chemin vers un refuge ou une sortie. Gibson a mis en évidence la relation qui existe entre la perception qu'un être humain se fait de son environnement et ses mouvements dans

3. Les comportements dans le cadre d'une évacuation

l'environnement [48]. Il introduit ainsi la notion de *champ optique ambient* qui est une version dérivée de la notion de champ de vision et aussi la notion d'*affordance* qui désigne « la capacité d'un objet à suggérer sa propre utilisation » [133], et par conséquent les possibilités d'interactions entre un individu et les autres entités de son environnement. Selon Gibson l'affordance de l'environnement est importante dans la prise de décision puisqu'elle permet d'orienter le choix des actions que peuvent être effectuées.

Toutefois, il n'est pas rare d'observer des individus qui ignorent les signaux de danger de l'environnement. Certains parviennent à relativiser l'ampleur du danger signalé, d'autres se dirigent vers la source du signal pour satisfaire leur curiosité, d'autres restent sur place pensant qu'il s'agit d'un signal d'exercice. La prise de conscience du danger varie d'un individu à un autre, elle dépend énormément des caractéristiques psychologiques, mentales, culturelles et sociales de l'individu concerné. Mais une fois que l'étape de prise de conscience est atteinte, la phase d'évacuation est entamée. Durant cette phase les capacités sensorielles des personnes sont mobilisées afin de reconnaître les lieux, éviter le danger, trouver la sortie et identifier des obstacles.

La perception joue un rôle important pendant les situations de danger en assurant la lecture des signaux d'alerte envoyés par l'environnement et l'identification de la destination vers les zones sûres.

3.2.3 Orientation spatiale

Un aspect important dans le déplacement des individus, est l'orientation spatiale dans l'environnement ce que désigne le terme anglais *way-finding*¹. Cet aspect est capital lors de l'évacuation puisqu'il assure la recherche d'un itinéraire susceptible de conduire la personne vers la sortie ou l'abri le plus proche. C'est un processus cognitif dépendant de divers paramètres psychologiques, sociaux et culturels et par conséquent sensible aux soudaines perturbations de l'environnement. Diverses disciplines se sont intéressées à l'étude du processus humain d'orientation dans l'espace, pour son intérêt applicatif en particulier dans la validation des architectures des bâtiments par exemple.

Wood [125] confirme dans ses études que sur 1000 cas d'incendies d'immeubles de petites dimensions, 95% des occupants ont quitté le bâtiment par le même chemin emprunté pour y pénétrer. Best [125] met l'accent sur le degré d'influence des bouleversements externes sur les choix des personnes. En effet, les individus deviennent

1. Le *way-finding* désigne les dispositifs conjoint d'orientation, d'identification et d'informations visuelles dans un lieu

de plus en plus dubitatifs sur le chemin à prendre lorsque la quantité d'information à interpréter est grande. Le stress peut constituer un facteur d'erreur dans le choix du chemin à emprunter ce qui ralentit le processus d'évacuation. Il n'est pas rare d'observer des individus se diriger vers une issue lointaine mais visible, plutôt que de rechercher une issue plus proche et moins encombrée.

Ceci tend à confirmer l'importance des interactions inter-individus dans le déroulement de l'évacuation, ainsi que le rôle de l'émotion dans la prise de décision. En effet, la peur, le stress et la panique impliquent une perte d'un certain degré de raisonnement, ce qui induit éventuellement à un « mauvais » choix de chemin d'évacuation.

3.2.4 Degré d'organisation de l'évacuation

En dépit de ce que laissent croire les médias et les croyances sociales, différentes formes d'organisations se forment lors d'une évacuation. Dans ce désordre apparent, il existe souvent de l'ordre voir même des stratégies d'évacuations. Les études effectuées à partir des analyses des sinistres [100] montrent l'influence des liens familiaux sur le déroulement de l'évacuation. L'absence de compétition entre les individus réduit le risque d'apparition de la panique, et par conséquent l'amplification de l'ampleur des perturbations. Les observations reconnaissent aussi l'influence du chef « leader » sur le bon déroulement de l'évacuation et sur la réduction de l'apparition des phénomènes de panique.

Néanmoins, la variation de certains facteurs psychologiques peut entraîner de graves conséquences sur les plans humain et matériel. Le sentiment de peur ou d'impuissance provoque parfois chez l'individu une perte de lucidité, pouvant conduire à l'apparition de la panique. Les décisions prises le sont alors de façon précipitée ; des mouvements de foule désordonnés émergent ce qui peut déclencher des mouvements collectifs de panique.

3.2.5 Synthèse

Le déplacement des individus ne se résume pas à éviter les obstacles et à fuir un danger. Chaque action entamée par une personne est le résultat d'un processus décisionnel, qui fait appel à des propriétés physiques, sociales, culturelles et notamment des propriétés cognitives. En situation de catastrophe particulièrement les propriétés cognitives influencent l'interprétation et l'analyse des signaux de danger par un individu, ce qui induit une diversité dans les comportements. Il nous semble donc tout à fait indispensable de considérer ces propriétés dans la perspective d'un modèle d'étude d'un phénomène comportemental tel que la panique.

3.3 Modélisation cognitive des comportements

Un comportement traduit la dimension cognitive, sociale, morale et culturelle des individus. Il reflète en effet, les désirs, les préférences, les croyances, les pensées et les motivations de ces derniers et permet d'associer une action en réponse aux variations de l'environnement. Le comportement est souvent considéré comme le résultat d'un processus décisionnel qui n'est autre qu'un processus de raisonnement qui peut s'appuyer sur des arguments rationnels et/ou irrationnels.

3.3.1 Le processus de prise de décision

La signification du terme « décision » varie selon le domaine d'étude. La théorie de la décision normative ou statistique stipule que la décision revient à sélectionner une stratégie particulière entre plusieurs choix d'actions possibles. La théorie des organisations, la théorie de la décision empirique et le domaine de l'intelligence artificielle définissent la décision comme un processus de traitement de l'information. Les psychologues quant à eux assimilent la décision au comportement. D'une manière générale la décision se caractérise par une grande diversité des logiques d'interprétation, mais finalement et indépendamment de l'approche choisie, la prise de décision est considérée comme un processus complexe qui vise à sélectionner un type d'action parmi différentes alternatives. Le choix final de l'individu conduit le plus souvent à un comportement adapté à la situation analysée.

La disparité des domaines de recherche sur le concept de la prise de décision et la multiplicité des thèmes traités ont conduit à la diversité des approches développées. Eisenhardt et Zbaracki [39] ont créé trois grandes catégories rassemblant la plupart des modèles dont regorge la littérature, et ce en se fondant sur trois importants paradigme :

1. La rationalité et la rationalité limitée ;
2. La politique et le pouvoir
3. Le *Garbage can*.

Rationalité et rationalité limitée

Le modèle rationnel de la prise de décision trouve ses racines dans les fondements de la sociologie et de la micro-économie. Cette approche rationnelle suppose que le processus décisionnel repose sur une analyse méthodique et linéaire qui permet d'obtenir une solution optimale face à un problème donné. La décision s'explique alors en termes d'options préférentielles prise par un décideur pleinement rationnel et parfaitement informé. Cette vision de la prise de décision a été abondamment critiquée en raison de sa non faisabilité, en effet la pratique montre qu'il est difficile d'opérer

sous des conditions de rationalité parfaite sur le plan individuel et environnemental.

L'économiste Herbert Simon [119] a été un des premiers à critiquer la conception rationnelle de la pensée économique. Il affirme que la complexité de l'environnement conduit à une faible disponibilité de l'information, à quoi s'ajoute la capacité cognitive limitée de l'individu, ce qui rend impossible la prise d'une décision optimale. Certes, le décideur admet un comportement rationnel mais sa rationalité est limitée, il s'arrête donc à la première décision qu'il jugera satisfaisante en évitant de consommer trop de temps à effectuer son choix (on retrouve ici ce que nous avons déjà évoqué au niveau de la panique selon l'école Américaine dans la section 3.2.1). Herbert Simon remet par ce fait en question le postulat de la rationalité de l'individu dans la prise de décision. D'autres études sont venues appuyer l'approche de Simon tel que les travaux de Carter [21] et Anderson [3] montrant que les décideurs cherchent des solutions de façon aléatoire et opportuniste.

La politique et le pouvoir

Les racines de l'approche politique dans la prise de décision stratégique découlent de la littérature en science politique des années 1950. Les auteurs qui soutiennent cette approche ont développé une vision de la prise de décision en phase avec la nature conflictuelle du processus législatif. Cette approche politique de la décision se fonde sur le fait que la décision est le résultat d'un processus décisionnel entre des individus ayant des intérêts divergents. La divergence des objectifs entre les décideurs amène ces derniers à s'allier afin d'obtenir des décisions adéquates mais non optimales.

Le modèle de *Garbage can*

La prémisse fondamentale de ce modèle est que la décision décrite dans le modèle politique et rationnel manque de sensibilité pour analyser les décisions prises dans les environnements complexes, instables et ambigus [39]. Le modèle *Garbage can* de Cohen et de ses collègues décrit principalement la prise de décision dans les organisations dites d'« une anarchie organisée » [25] et qui s'inscrit exactement dans la vision d'une rationalité dite contextuelle. Ce sont en fait des organisations dont les buts et les préférences des participants sont ambiguës et dont la technologie est mal définie, c'est-à-dire que ses processus et ses motivations sont mal compris par ses membres et dont l'implication des membres varie dans le temps pour un même processus de décision.

3. Les comportements dans le cadre d'une évacuation

Selon Eisenhardt et Zbaracki [39] l'idée centrale du modèle de *Garbage can* est la confirmation de l'existence d'une anarchie organisée. Cependant les rares études effectuées ne permettent pas la validité de cette approche. Ces derniers estiment que les décisions stratégiques peuvent être définies comme la combinaison de l'approche rationnelle et de rationalité limitée et de l'approche politique.

3.3.2 Les modèles décisionnels

Les recherches portant sur la prise de décision se caractérisent par une diversité des logiques d'interprétation, mais toutes reconnaissent le caractère multidimensionnel de la décision et suggèrent d'intégrer dans l'analyse et la modélisation du processus décisionnel les différentes dimensions de ce dernier ainsi que les divers facteurs susceptibles d'exercer une influence sur lui. Suite à ces nombreux travaux de recherche, de nombreux modèles représentant les différentes phases du processus décisionnel ont été développés. Nous présentons trois modèles afin d'illustrer les différentes étapes décisionnelles : le modèle de John Dewey, le modèle IMC d'Herbert Simon et le modèle de Mintzberg.

Le modèle séquentiel de John Dewey

John Dewey est le premier à décrire les différentes étapes du processus décisionnels. Il propose alors en 1910 un modèle séquentiel de décision divisé en cinq étapes :

- Sensation de difficulté ;
- Définition du caractère de cette difficulté ;
- Suggestion des solutions possibles ;
- Évaluation de la suggestion ;
- Observations et expérimentations supplémentaires qui peut mener à une acceptation ou un rejet de la suggestion.

Le modèle séquentiel IMC (Intelligence-Modélisation-Choix)

Inspiré des travaux de John Dewey, l'économiste Herbert Simon propose en 1960 un modèle séquentiel IMC (Intelligence, Modélisation et Choix) composé de trois phases :

- Intelligence : renseignement et formulation du problème ;
- Modélisation : évaluation des solutions possibles et réalisables ;
- Choix : élaboration du choix compte tenu des contraintes.

Les décisions sont alors le résultat d'une série d'étapes logiques et linéaires. Le décideur identifie d'abord le problème, rassemble les données jugées pertinentes,

élabore un certain nombre de solutions, évalue les différentes alternatives en fonctions des critères préalablement déterminés et enfin choisit la solution qui lui semble satisfaisante.

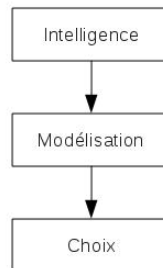


FIGURE 3.2: Le modèle séquentiel IMC (Intelligence-Modélisation-Choix) d'Herbert Simon .

Le modèle non séquentiel de Mintzberg *et al*

Le découpage analytique des modèles séquentiels a fait l'objet de nombreuses critiques notamment par Mintzberg, Raisinghani et Théorêt [80] qui affirment que les décisions ne procèdent pas toutes une même logique séquentielle. Ils suggèrent ainsi une modélisation non séquentielle du processus de la décision, le modèle proposé est composé de trois phases :

- Phase d'identification : identifie et délimite le problème. Elle se compose de deux routines : 1) l'identification des problèmes et des opportunités dans un flot de données ambiguës et principalement verbales, 2) le diagnostic ou l'exploitation des canaux d'informations existants et l'ouverture de nouveaux canaux pour clarifier et définir les orientations.
- Phase de développement : définit et clarifie les différentes options envisageables. Cette phase est composée de deux routines : 1) recherche qui détermine les solutions prêtes à l'emploi, 2) conception qui développe de nouvelles solutions ou modifie les existantes.
- Phase de sélection : évalue les options et choisit une solution. Elle se compose de trois routines : 1) lecture qui détermine les différentes alternatives, 2) évaluation-choix qui permet de choisir réellement entre les différentes alternatives, trois modes sont possibles soit par jugement (intuitif), par négociation ou par analyse, 3) autorisation qui est l'approbation de la solution choisie par toutes les entités concernées.

3. Les comportements dans le cadre d'une évacuation

Ce modèle traduit une démarche itérative, la relation entre les différentes phases et routine est circulaire plutôt que linéaire (figure 3.3). Le décideur peut faire un cycle et interrompre le processus quand il le décide.

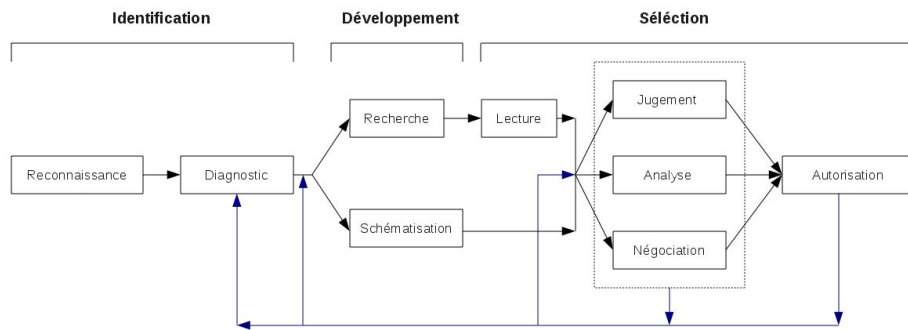


FIGURE 3.3: Le modèle décisionnel de Mintzberg, Raisinghani et Théorêt [80].

3.3.3 La structure cognitive de l'individu et la prise de décision

Malgré les progrès considérables dans le domaine de recherche relatif à la prise de décision, certaines limites restent présentes. Trois limites sont identifiées dans la littérature : la réification, la déshumanisation et l'isolement [68]. La première limite dénoncée par de nombreux chercheurs concerne la vision restrictive de la décision, qui tend à restreindre la décision à un ensemble d'événements discret. La deuxième limite touche plutôt la déshumanisation de la décision, ce qui rend la décision insensible à l'hétérogénéité des individus, à l'émotion et aux propriétés cognitives humaines. Et enfin la dernière limite identifiée est l'isolement, en raison de l'absence de relation et de lien entre les processus décisionnels.

Nous nous attardons dans notre travail à la limite relative à la déshumanisation du processus de décision. Cette limite est la prémisse que la décision développée dans un modèle séquentiel ou circulaire est insensible aux différences individuelles, à l'émotion et aux caractéristiques cognitives humaines [68]. Cette déshumanisation exclue en quelque sorte le décideur du processus de décision, alors que ce dernier est au cœur de la décision. De nombreux chercheurs à l'instar de Desreumaux [35]

et Bronner [18] reconnaissent l'importance de l'intégration de la structure cognitive de l'individu dans la prise de décision.

En effet, la structure cognitive renvoie aux caractéristiques cognitives humaines. Elle intègre les croyances, l'expérience, les valeurs et les préjugés de l'individu et sa perception de son environnement [23]. La perception d'un danger par exemple peut provoquer un sentiment de peur chez certaines personnes, alors que chez d'autres un sentiment de curiosité, voir même de l'indifférence. Tout individu admet sa propre structure cognitive qui le différencie des autres et qui intervient dans sa décision et par conséquent dans son comportement.

Les propriétés cognitive jouent donc un rôle primordial dans la prise de décision, c'est devenu d'ailleurs une partie intégrante des recherches dans le cadre de la théorie de la décision. Sur le plan décisionnel la variation de la décision s'explique par une divergence de l'évaluation de la situation pour chaque individu. Ce qui se déroule au niveau de la phase d'évaluation dans le processus de décision.

La phase d'évaluation

La phase d'évaluation est au cœur des études de la décision en présence des structures cognitives. C'est un thème très étudié dans la recherche cognitive, depuis 1872 avec Charles Darwin qui a remarqué dans ses observations que « la prise de décision s'accompagne d'un froncement de sourcils indiquant un embarras de l'esprit et une émotion exprimée avant l'action » [129]. Depuis, les études qui s'intéressent au comportement et au raisonnement ont connu de remarquables évolutions. Telles que le développement de nouvelles approches intègre le processus psychologique dans la prise de décision ce qu'omettait le behaviorisme. Suite à ces évolutions, un nouveau domaine interdisciplinaire a ainsi vu le jour, celui des sciences affectives, issu du besoin de prendre en compte l'émotion et d'autres phénomènes affectifs pour appréhender le fonctionnement psychologique et cognitif du comportement humain.

De surcroît, une branche récente de la théorie suggère que l'émotion est un outil indispensable dans le processus d'évaluation, qui d'ailleurs se révèle souvent d'une grande utilité quand il s'agit d'effectuer un choix dans des conditions où la rationalité fondée sur la logique se trouve limitée par un manque d'information. Ces théories sont des théories des évaluations cognitives, elles portent sur le mécanisme d'évolution de l'émotion dans le temps jusqu'à l'atteinte d'un état particulier tel que la joie, la peur ou la panique.

Les théories de l'évaluation cognitive estiment que la diversité des propriétés individuelles notamment psychologiques et cognitives affecte les décisions et les ac-

3. Les comportements dans le cadre d'une évacuation

tions des individus. En effet, la perception et le traitement du stimulus déclenche une émotion qui varie selon l'état mental, social et psychologique de la personne concernée, ce qui se traduit par le déclenchement d'un comportement adaptés à la nouvelle situation. En 1960 une théorie de l'évaluation cognitive appelée « théorie de l'appraisal » a vu le jour et a permis de détailler le rôle de l'émotion dans l'évaluation subjective d'un événement. L'hypothèse principale de cette théorie est que ce n'est pas une situation particulière qui définit la réaction émotionnelle d'un individu, mais c'est plutôt la façon dont un individu évalue sa relation avec son environnement qui définit sa réaction émotionnelle.

Magda Arnold [5] est la première à avoir utilisé le terme *appraisal* pour décrire les diverses évaluations cognitives que les individus font d'un événement. Depuis, de nombreux auteurs ont développé leurs propres théories des appraisal. Il est difficile d'identifier une liste exhaustive de ces théories. Scherer [117] propose une classification des théories en quatre grandes catégories. La première classe d'approche est une approche classique qui se base essentiellement sur les travaux de Magda Arnold et qui regroupent aussi certains auteurs tel que Scherer [114], Frijda [45], Rosman [108] et Smith et Ellsworth [121]. Selon cette classe d'approche il existe un ensemble de critères d'évaluation qui permettent de déterminer la réaction émotionnelle de chaque individu. Ils peuvent être repartis en quatre catégories :

- Les caractéristiques d'un événement tel que la nouveauté et la plaisance de la situation ;
- Les conséquences de l'événement sur les buts de l'individu ;
- La capacité de l'individu à gérer la nouvelle situation ;
- La relation entre la nouvelle situation et les normes sociales et personnelles de l'individu.

La deuxième classe d'approche d'évaluation cognitive met l'accent sur la causalité de l'événement. Les émotions sont ainsi distinguées sur la base du type d'attribution de la nature de l'événement par l'individu (*i.e* événement externe ou interne), sur le degré de responsabilité face l'événement et sur le degré de contrôle des conséquences de cette perturbation [132, 1]. La troisième classe d'approche est développée par Lazarus [69]. Selon cette approche les émotions admettent plusieurs fonctions telles que l'aide à l'évaluation de la nouvelle situation et le contrôle de l'efficacité des comportements entrepris. Lazarus et Smith [122] proposent ainsi un modèle permettant de comprendre la capacité de l'individu à s'adapter aux variations de son environnement. La quatrième classe d'approche étudie la logique des opérations qui permettent l'identification d'une émotion [123, 34].

Malgré les divergences entre ces théories de l'évaluation, une convergence existe en ce qui concerne la dépendance de la notion des évaluations cognitives aux émotions. L'émotion est considérée comme le produit de l'évaluation subjective de l'en-

vironnement, qui dépend justement des propriétés cognitives de l'individu à savoir sa personnalité, son humeur, ses expériences, sa culture et ses normes sociales. L'interprétation de l'événement déclenche donc l'émotion et ce n'est pas l'événement en soi qui cause l'émotion. Les différentes théories de l'appraisal apportent aussi une réponse identique concernant l'émergence d'une même émotion à des différents événements. Prenons par exemple deux événements distincts tel qu'un échec lors d'un examen et une défaite pendant une épreuve sportive. Selon les théories de l'appraisal, l'interprétation de ces deux événements comme un échec peut provoquer chez un individu le déclenchement d'une émotion de tristesse. Le déclenchement d'une même émotion en réponse à deux événements distincts est donc dû à l'utilisation d'un même patron d'évaluation.

Nous pouvons affirmer donc à partir de ces approches que le processus d'évaluation précède et contribue au déclenchement de l'émotion. Cette évaluation émotionnelle influence la prise de décision, et donc le comportement des individus face à une perturbation.

Le modèle d'évaluation de Scherer

Nous présentons dans ce qui suit un exemple de modèle d'évaluation, le modèle appelé *Sequential Check Theory of Emotion Differentiation* élaboré par Scherer [116] (figure 3.4). Ce modèle est basé sur un ensemble de critères appelé *Stimulus Evaluations Checks (SECs)* qui se divise en quatre objectifs d'évaluation. Ces objectifs concernent les divers types d'informations dont a besoin une personne pour prendre une décision adéquate selon la situation vécue :

- L'adéquation (*relevance*) : détection de la pertinence du stimulus en fonction des besoins et des buts de l'individu. « Est-ce que la situation est appropriée pour moi ? Est-ce qu'elle m'affecte directement ou mon groupe de référence social ? ».
- L'implication (*implications*) : évaluation du degré d'aide ou de nuisance du stimulus à la survie de l'individu ainsi qu'à la réalisation des objectifs. « Quelles sont les implications ou les conséquences de l'événement et comment ces derniers affectent-ils mon bien-être et mes buts à court et à long terme ? ».
- Le potentiel de gestion de la situation (*coping potential*) : identification de la capacité de l'individu à l'adaptation ou au contrôle de la nouvelle situation : « Jusqu'à quel point puis-je bien gérer ou m'ajuster aux conséquences de l'événement ? ».
- Appréciation (*normative significance*) : évaluation de la situation. « Quel est la signification de l'événement en tenant compte de mon concept de soi, des normes et valeurs sociales ? ».

Chacune de ces catégories se divise en un ensemble d'évaluation [117]. La première catégorie, l'adéquation, se divise en trois types d'évaluations à savoir la nou-

3. Les comportements dans le cadre d'une évacuation

veauté, la plaisance et la pertinence des buts. La nouveauté évalue la soudaineté de la perturbation et la familiarité de l'individu face à cette dernière. L'évaluation de la plaisance détermine la réaction de l'individu à savoir l'appréciation ou l'aversion d'un stimulus. La pertinence évalue le degré d'importance du stimulus pour l'individu selon ses buts. Un stimulus est ainsi considéré adéquat s'il affecte les objectifs de l'individu et non adéquat si les variations apportés ne produisent aucun effet.

La deuxième catégorie concerne l'implication de l'événement pour l'individu. Les résultats de cette catégorie permettent d'identifier les conséquences directes de l'événement sur les buts et d'évaluer le degré d'aide ou de nuisance de l'événement à la survie de l'individu. Scherer propose d'évaluer dans cette catégorie :

- L'attribution causale : identification des causes de l'événement ;
- Les résultats probables : évaluation de la certitude des conséquences possibles du stimulus ;
- La normalité de l'espérance de l'événement : évaluation de la congruence entre l'occurrence de l'événement et ses conséquences ;
- La conductance au but : évaluation du stimulus en fonction des buts et des besoins de l'individu ;
- L'urgence : évaluation du niveau d'urgence de la nouvelle situation en fonction des buts et des nécessités temporelles.

La troisième catégorie concerne le potentiel de gestion de la situation qui consiste à déterminer le degré d'adaptation face à la nouvelle situation. Trois types d'évaluation sont identifiés dans cette catégorie :

- Le contrôle : évaluation de la capacité de l'individu à maîtriser la situation en s'appuyant sur les ressources dont il dispose ;
- La puissance : évaluation du degré de contrôle de la situation ;
- L'ajustement : identification du degré d'adaptation ou d'ajustement de l'individu à la nouvelle situation.

La dernière catégorie d'évaluation est l'appréciation qui effectue une évaluation de la situation selon les normes sociales. L'individu évalue dans un premier temps la situation selon ses standards internes à savoir son code moral et son concept de soi, puis selon les standards externes soit les normes de la société.

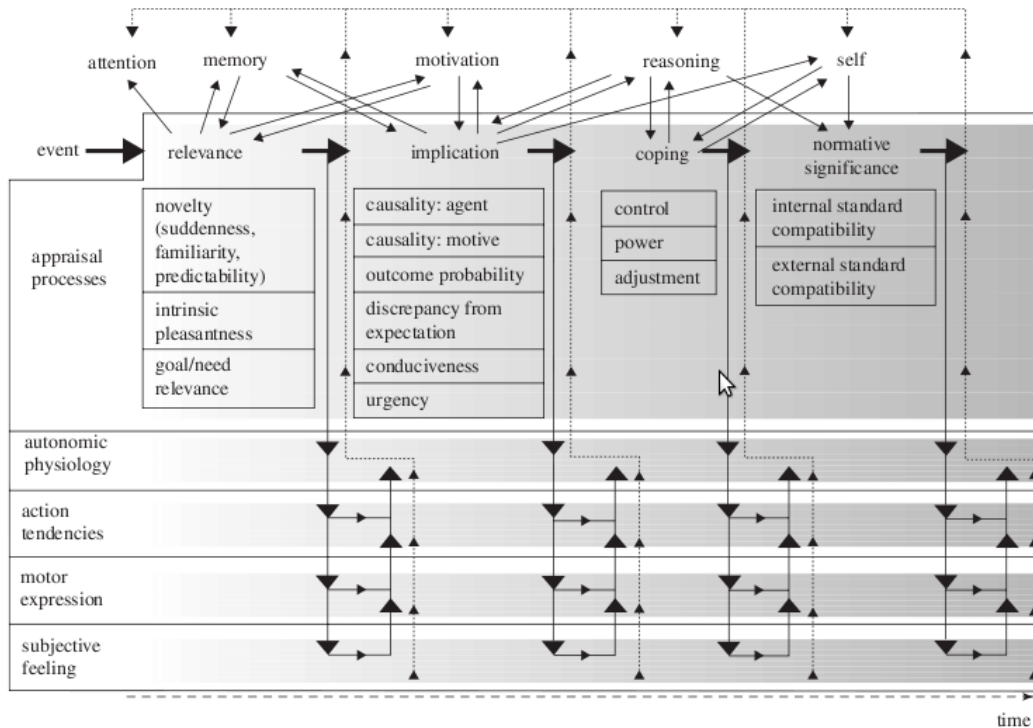


FIGURE 3.4: Illustration du modèle d'évaluation émotionnelle de Scherer *component process model (CPM)* [116].

Scherer établit au travers de ce modèle un processus d'évaluation réaliste dans la mesure où l'évaluation de l'individu est subjective et se produit sur une base continue, durant laquelle ce dernier réévalue continuellement, son environnement afin de détecter les éventuelles variations autant internes qu'externes. L'intégration de l'émotion dans le modèle vient renforcer l'approche réaliste dans ce processus d'évaluation. En effet, Scherer considère l'émotion comme un dispositif affectif d'évaluation qui s'interpose entre l'évaluation cognitive d'une situation et l'action humaine. Selon ce dernier, l'adaptabilité des individus à leur environnement est due en une très grande partie aux émotions, qui provoquent un découpage du comportement et des stimuli [118].

3.4 Le comportement humain durant une catastrophe et ses conséquences sur la mobilité

Le comportement humain présente divers aspects psychologiques (section 3.3) relatifs au déroulement du processus d'évaluation. Il semble difficile d'ignorer l'impact de cet aspect cognitif sur l'évolution des comportements de l'individu et par conséquent de la foule. Un aspect a été très longtemps ignoré par la pensée cartésienne. La prise en compte de ces propriétés est devenue primordiale dans tous les domaines de recherche impliquant l'être humain. Nous présentons dans cette section quelques travaux d'observations du comportement humain en situation d'évacuation, ainsi que les tentatives d'élaboration de modèles découlant de ces observations.

3.4.1 Études du comportement de l'individu durant l'évacuation

De nombreuses études ont été entreprises aux États Unis et en Grande Bretagne pour observer et étudier le comportement humain en situation de catastrophe. L'effort a souvent porté sur une reconstruction de la catastrophe, au moyen de techniques de recueil de témoignages. Les récits ont été par la suite traités afin de dégager des informations sur l'évolution des comportements des individus au cours du temps. Nous exposons dans cette section les travaux effectués par Quarantelli au sein du *Disaster Research Center* de l'université de Delaware aux États-Unis ainsi que d'autres travaux complémentaires.

Étude du comportement de panique dans un incendie [99]

La méthodologie de Quarantelli consiste à collecter des données issues à la fois de grands journaux tel que *The New York Times* ou *The Washington Post* et de recueils des témoignages directs de personnes impliquées dans la catastrophe. À partir de ces éléments, il a effectué une analyse décrivant les causes ainsi que les conditions d'apparition de la panique au sein d'une foule et les conséquences en terme individuel. À notre connaissance ce travail n'a pas été complété par des simulations.

Les observations de Quarantelli montrent que l'attention des personnes dans de telles situations est tournée vers ce qui pourrait se passer et non sur ce qui se passe à l'instant même. Les comportements des individus sont donc issus d'une évaluation prospective des conséquences du danger plutôt qu'une évaluation rétrospective.

Les résultats peuvent être présentés sous forme de récapitulatif dans le tableau 3.2 :

3.4. Le comportement humain durant une catastrophe et ses conséquences sur la mobilité

TABLE 3.2: Récapitulatif de recueil de témoignage d'individus impliqués dans une catastrophe.

Mode de prise de connaissance de la catastrophe	Action entreprise
Sentir puis voir la fumée	Fuite
Entendre un bruit et sentir une chaleur	Quitter le local
Porte de sortie bloquée	Sortir par la fenêtre
Sentir des secousses	Quitter la maison
Croire que l'immeuble va s'écrouler	Quitter l'immeuble

Les témoignages montrent la présence d'une certaine rationalité dans le comportement des individus. La panique ressentie n'est autre que le résultat d'une projection du danger sur soi même et d'un accroissement de la sensation de peur. C'est une conséquence logique du processus d'évaluation dans une situation de danger. La décision de fuir est une décision non-sociale certes sans pour autant être anti-sociale. C'est en effet, une solution que l'individu juge adéquate vu les circonstances.

D'une manière générale, la panique ressentie par les individus n'engendre pas forcément des comportements inappropriés. Au contraire, dans certaines situations elle peut se présenter comme une solution pour échapper au danger tel qu'une décision de fuite en direction des flammes, si cette direction est la seule issue dans une pièce.

Étude du comportement lors d'une menace d'ouragan [106]

Cette deuxième étude porte sur l'analyse de la décision d'évacuation dans une situation d'urgence en fonction de quatre processus à savoir : la perception du risque, la préparation à affronter la nouvelle situation, l'influence sociale et la disponibilité des ressources économiques. Les résultats indiquent que la perception du danger et le mimétisme qui s'installe dans la foule sont les véritables déclencheurs des comportements d'évacuation dans les situations de crise.

La perception du risque : Durant cette étude les chercheurs ont analysé des témoignages de 777 personnes qui ont vécu une menace d'ouragan de catégorie 4.

3. Les comportements dans le cadre d'une évacuation

Les résultats montrent que 33 % des individus qui n'ont pas évacué la zone de danger sont convaincus que l'ouragan ne présente pas une menace et 25 % d'entre eux sont persuadés qu'ils sont en sécurité. La variation des comportements réside dans la disparité de niveau de l'évaluation du risque entre les personnes [94, 60] et dans les caractéristiques personnelles de chaque individu [60, 36]. La perception et l'évaluation du risque sont des paramètres importants d'analyse et d'étude dans les situations de crise. En effet, ils influencent le flux d'évacuation ainsi que l'évolution de la situation de crise.

La préparation : Les observations montrent l'importance de la préparation dans la gestion de l'évacuation. La préparation désigne une forme de connaissance générale qui permet de faciliter le processus d'évacuation en permettant aux individus d'avoir le comportement le mieux approprié dans une situation de danger. La capacité des individus à évacuer dans un laps de temps très court dépend de deux formes de préparation : proactive qui est une action préventive qui apparaît en réponse à un danger éventuel et réactive qui est une action immédiate qui surgit en réponse à un danger immédiat. Bien que certains désastres surviennent soudainement, les satellites et d'autres moyen de communication permettent de nos jours de prévenir la population avant la survenue du danger, afin de favoriser ce comportement proactif qui assure une meilleure préparation et par conséquent une prise de décision adéquate selon la situation.

L'influence sociale et les normes : Le flux d'évacuation varie selon la population et l'influence des normes sociales. Lorsqu'une alerte est perçue dans une foule, les individus s'engagent dans ce que les chercheurs appellent « le processus de confirmation de l'alerte ». Chaque personne communique avec les autres personnes afin de connaître leurs interprétations de l'évènement, puis entame une phase d'observation des comportements des autres. Les observations montrent l'influence de la société et des normes sociales sur les décisions pendant une évacuation [82], ainsi que les caractéristiques de chaque individu tel que l'origine [93, 107], l'âge [101] et le sexe [107].

L'accès aux ressources : Les ressources désignent les biens stables que l'individu possède tels que la santé, les liens familiaux et les ressources matérielles. L'absence de ressource peut affecter énormément la décision d'évacuation. Dans son étude *Riad et al* [107] montrent que 10% des individus qui n'ont pas évacué justifient leurs comportement par l'absence de ressources sociales et économiques les conduisant à fuir le danger. Les ressources matérielles et familiales présentent en effet un moyen de dissuasion et de soutien pour la prise de décision dans une situation de

3.4. *Le comportement humain durant une catastrophe et ses conséquences sur la mobilité*

catastrophe.

Ces deux études présentent les tendances générales comportementale en situation de catastrophe. Les résultats nous permettent d'identifier les différentes attitudes qui peuvent être recensées dans une foule. Il est possible de retenir les éléments majeurs suivant :

- Lors d'une variation brusque de l'environnement, l'individu a un besoin pressant d'information sur le danger et sur son origine. Ce désir d'acquisition de l'information peut être satisfait soit par un déplacement vers la source ou en recueillant des informations dans l'entourage ou en s'informant auprès des autorités, etc.
- L'interprétation du signal de danger varie d'un individu à un autre et ce en fonction de l'individu, de sa familiarité avec le lieux, des moyens économiques et sociaux etc.
- Le comportement social est souvent observé dans les situations de danger. Les individus ont tendance à se diriger vers les personnes et les lieux qui leurs sont familiers.

3.4.2 Modèles comportementaux

Modèle descriptif

Quarantelli propose un modèle comportemental [99] pour décrire le processus d'apparition de la panique dans une foule, en se fondant sur le travail d'étude et d'observation des comportements dans le cas d'une panique (section 3.4.1). Le modèle identifie deux types de conditions d'apparition de la panique :

- Des conditions contextuelles qui forment essentiellement les croyances de l'individu ainsi que celles de la société par rapport à un danger,
- Des conditions immédiates qui sont directement liées à la perception et l'analyse du danger potentiel que peut présenter le stimulus, amplifié par le sentiment d'incapacité et d'isolement du reste de la population.

L'émergence de la panique selon ce modèle est soit inattendue (e.g évolution du sentiment de peur) soit évidente (e.g apparition de comportement antisocial) et peut avoir des conséquences fonctionnelles ou dis-fonctionnelles. La figure 3.5 résume le modèle de Quarantelli.

3. Les comportements dans le cadre d'une évacuation

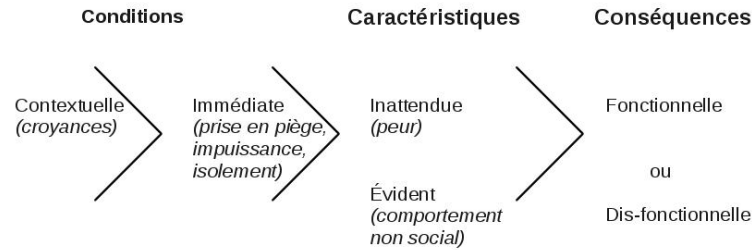


FIGURE 3.5: Illustration du modèle des phénomènes de panique de Quarantelli [99].

Modèle expérimental

Partant de l'idée que la décision d'évacuation dans une situation de crise est influencée par quatre paramètres : la perception, la préparation, l'influence sociale et l'accès aux ressources, Quarantelli propose un modèle comportemental qualitatif fondé sur l'expérimentation. L'expérience se déroule avec un échantillon de 1000 individus de 250 villes menacés par le passage d'un ouragan. L'expérimentation consiste à contacter les individus avant, pendant et après le danger dans le but de récolter et analyser les informations selon les quatre paramètres d'étude. Les résultats de ce modèle ont permis de valider l'importance des critères identifiés par Quarantelli dans la prise de décision dans les situations de danger. En effet, les données récoltées dans les expérimentations montrent l'influence de la perception sur les individus (selon leurs âges, ethnies, expériences, etc) dans la prise de décision d'évacuer la zone de danger.

Les modèles de comportement humain sont d'une utilité explicative cependant leurs portées prédictives restent limitées. Il suffit pour cela d'observer les comportements selon la nature et les propriétés des individus pour constater qu'il est impossible d'établir un schéma globalisant de comportement en situation de danger. La non intégration de la dimension psychologique et cognitive de l'individu et de la foule en question demeure un obstacle considérable pour la validation des résultats des modèles comportementaux.

3.5 Synthèse du chapitre

Le processus d'évacuation dans une foule dépend en réalité d'une multitude de facteurs difficilement appréhendables, qu'ils soient d'ordre cognitifs, psychologiques ou sociaux. Outre la difficulté de prédiction des comportements des individus, l'observation des comportements à un niveau général révèle la difficulté de produire un schéma global du processus d'apparition des comportements au niveau de l'individu. Cependant, ces observations montrent la cohérence des comportements adoptés par les individus en particulier et la foule en général. Ceci confirme que les décisions en situation de crise restent rationnelles, plus précisément de « rationalité limitée ». La panique peut parfois émerger et engendrer des conséquences dramatiques, par contre sa présence n'est pas indissociable des catastrophes.

Ce chapitre permet de mettre en lumière la nécessité d'orienter la modélisation des comportements de la foule vers une modélisation cognitive. Désormais on ne peut plus ignorer le rôle du processus de l'évaluation, de l'émotion et du raisonnement dans l'étude des comportements dans le cadre d'une évacuation. On doit penser à intégrer certaines propriétés cognitives de l'individu pour la prise de décision dans les mouvements foule partant du postulat que les comportement au niveau de l'individu affectent le comportement global de la foule.

Méthodologie et éléments d'une démarche de modélisation du phénomène de panique dans les mouvements de foule

4.1	Introduction	77
4.2	Modélisation de l'environnement	78
4.3	Modélisation cognitive de l'individu	81
4.3.1	Architecture cognitive de l'individu	82
4.3.2	La structure <i>BDI</i>	84
4.3.3	Les modules	86
4.4	Modélisation de la panique et de son processus de propagation	89
4.4.1	Le modèle déterministe de Hamer : modèle SI	91
4.4.2	Le modèle déterministe de Kermack et McKendrick : Le modèle SIR	92

4.1 Introduction

La modélisation des déplacements de foule dans un environnement complexe nécessite une représentation efficace des individus ainsi que de leurs environnements. Nous présentons dans ce chapitre notre démarche de modélisation, nous l'abordons suivant deux axes : la modélisation de la mobilité puis celle de la panique et son processus de propagation dans la foule. La modélisation de la mobilité est divisée en deux parties, nous exposons tout d'abord notre approche de représentation de l'environnement puis nous développons notre modèle d'agent cognitif.

4.2 Modélisation de l'environnement

La prise en compte des relations entre un individu et son environnement repose à la fois sur un modèle d'interaction et une représentation de cet environnement accompagnée d'une interprétation. L'élaboration d'une architecture efficace de l'environnement virtuel est donc une tâche très importante dans notre modèle. Nous avons opté dans notre approche de modélisation de l'environnement des agents pour un modèle d'espace continu, dans la mesure où la notion de distance est significative, ce qui apporte d'ailleurs une représentation plus fidèle du système réel.

La modélisation de l'espace repose sur deux couches :

1. Une première couche qui représente l'espace matériel dans lequel les individus évoluent. L'espace est bidimensionnelle et est composé d'objets fixes tels que les murs, le mobilier et d'autres obstacles et des objets mobiles qui sont les autres agents du modèle.
2. Une deuxième couche qui représente une structuration de l'environnement qui nous permet de casser la complexité au niveau des calculs. Cette technique souvent utilisée dans le domaine du traitement d'images, consiste à regrouper les pixels d'une image selon des critères pré-définis, formant ainsi des régions connexes. Il existe de nombreuses méthodes de segmentation dans la littérature, que nous pouvons regrouper en quatre principales approches :
 - Segmentation fondée sur les régions, basée sur le principe de croissance de région appelé aussi principe de décomposition/fusion.
 - Segmentation fondée sur les contours, où les régions sont délimitées par les contours des objets qu'elles représentent.
 - Segmentation fondée sur la classification ou le seuillage des pixels en fonction de leurs intensités. Dans cette approche les pixels sont classifiés selon une valeur seuil bien définie.
 - Segmentation fondée sur les trois précédentes approches.

Nous avons opté pour une décomposition de l'environnement des agents selon l'approche région. Nous proposons une décomposition en quadtree dans laquelle chaque région peut être décomposée en quatre sous-régions lorsqu'un certain critère d'homogénéité n'est pas satisfait. Cette structure de données est souvent utilisée pour partitionner un espace bidimensionnel en le subdivisant récursivement en quatre nœuds (figure 4.1). Ce qui permet de discrétiser l'espace de façon plus efficace qu'un découpage simple à l'aide d'une grille.

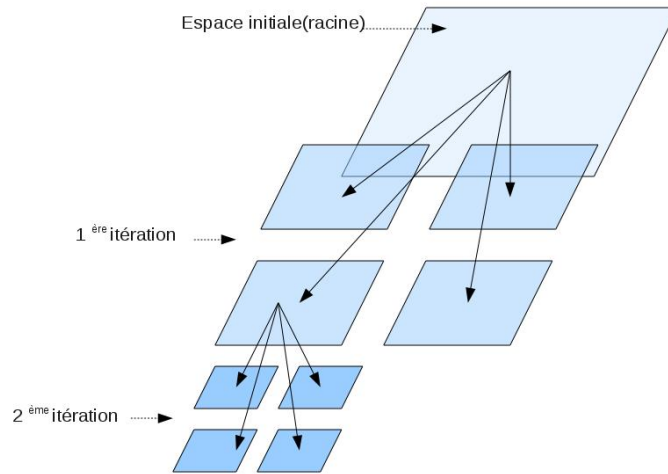


FIGURE 4.1: Subdivisions successives de l'espace jusqu'à convergence.

La partition initiale de notre environnement est réalisée en divisant récursivement l'espace en région de taille identique tant qu'une région n'est pas homogène. Lors de cette phase nous créons un graphe d'adjacence, où chaque région est associée à un sommet du graphe et les arêtes incidentes le relient aux sommets représentant les sommets limitrophes. La phase de fusion de l'approche région utilise ce graphe d'adjacence pour modifier la partition initiale. Elle consiste en effet à regrouper les sommets voisins du graphe d'adjacence ayant des caractéristiques d'homogénéité proches (première couche : figure 4.2 et deuxième couche : figure 4.3).

4. Méthodologie et éléments d'une démarche de modélisation du phénomène de panique dans les mouvements de foule

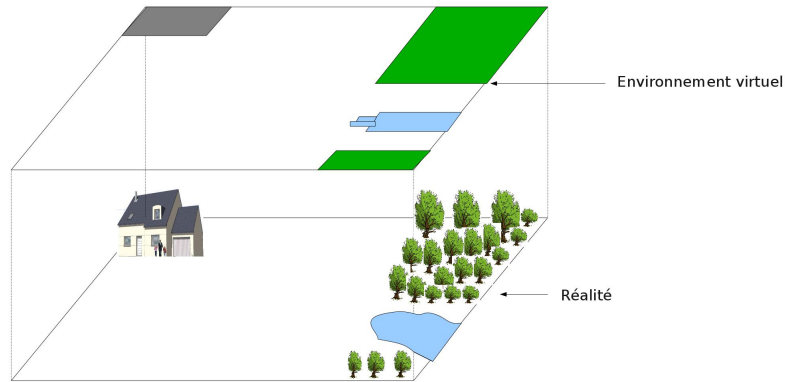


FIGURE 4.2: Élaboration de l'environnement virtuel des agents en se fondant sur un environnement réel. Les objets sont modélisés selon leurs formes et leurs types par une forme géométrique simple et une couleur. Dans notre exemple la maison est modélisée par un parallélogramme de couleur gris, les deux parties de la forêt par deux parallélogrammes de taille différentes de couleur verte et le lac par une association de trois parallélogrammes de taille différentes de couleur bleue.

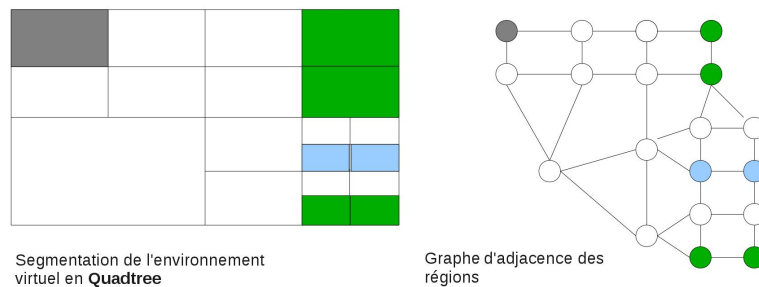


FIGURE 4.3: Partition de l'environnement selon l'approche région. La figure illustre la phase de décomposition dans laquelle on subdivise successivement l'espace en région jusqu'à convergence d'un critère d'homogénéité. La structure de Quadtree ainsi obtenue permet une navigation facile entre une région et ses sous régions, mais ne permet pas la navigation entre les régions voisines. Pour cela nous construisons un graphe d'adjacence fondé sur la structure du Quadtree qui indiquera les relations de proximité entre les différentes régions de l'environnement segmenté.

Nous associons à cette structure Quadtree de l'environnement un algorithme de recherche du plus court chemin A* pour identifier les chemins de déplacement des individus. Cette association entre le Quadtree et l'algorithme A* nous permet d'optimiser la modélisation de la mobilité pour un très grand nombre d'individus. Nous détaillons cette modélisation de l'environnement dans le chapitre 5.

4.3 Modélisation cognitive de l'individu

Nous proposons dans cette partie une approche de modélisation microscopique des mouvements de foule ayant pour objectif principal de simuler la mobilité dans le cadre des situations normales ou catastrophiques. Parmi les nombreux modèles de mouvement d'individus que nous avons cités dans le chapitre 2, la modélisation agents est celle qui répond au mieux aux exigences d'une modélisation réaliste des comportements des individus. Fondée sur l'idée de pouvoir simuler le comportement humain, cette approche descriptive a pour vocation de rendre compte du mécanisme comportemental et des mécanismes sous-jacents aux phénomènes globaux observés, tel que les phénomènes d'auto-organisation. Nous optons pour une modélisation des individus fondée sur cette approche agent, appelée aussi approche individu-centrée.

Cette dernière porte sur un niveau d'organisation particulier qui est l'individu, et où la simulation de l'ensemble des individus va conduire à l'émergence d'une structure globale. Le terme « individu centré » est plutôt issu de la biologie, plus précisément de l'écologie [52]. Pour désigner la même notion les informaticiens, les sociologues ou les économistes se réfèrent souvent au terme de « modélisation agent » tandis que les physiciens utilisent quant à eux le terme de « micro-simulation » [75, 76]. Quoi qu'il en soit, ces différents termes couvrent une même approche de modélisation dans laquelle la dynamique d'un système est déterminée à partir de la représentation et de la simulation de ses entités constituantes. C'est justement pour cette raison que le modèle individu-centré est identifié comme un modèle « bottom-up » dans la mesure où il est défini à partir de ses constituants « par le bas : *bottom* » et dont la simulation permet d'observer le comportement global « le niveau haut : *up* ».

Cette démarche de modélisation comprend ainsi deux niveaux d'organisation : le local et le global. Le niveau local est composé en effet par des entités autonomes du système dont les capacités de perception et d'action sont limitées par rapport au niveau global. Cependant, ce dernier n'est défini qu'implicitement puisqu'il est le résultat de la réunion de l'ensemble des entités. D'une manière générale cette approche de modélisation assure la définition du système implicitement par la conjonction des interactions entre les constituants. La capacité de cette approche à vulgariser la science de la complexité et à « capturer des phénomènes émergents »,

4. Méthodologie et éléments d'une démarche de modélisation du phénomène de panique dans les mouvements de foule

pour reprendre l'expression d'Éric Bonabeau [16], nous semble appropriée à la modélisation d'un système complexe social tel que la foule (chapitre 2).

L'approche retenue nous permet de modéliser des individus autonomes, capables de raisonner et d'analyser leurs environnements afin de choisir les actions appropriés en fonction de leurs objectifs. Un individu est ainsi modélisé par un agent doté de capacité cognitive à savoir : la perception, l'interprétation/la décision et la réaction/l'action. La puissance de cet agent réside essentiellement dans sa faculté représentative, en d'autres termes dans sa capacité à élaborer son propre modèle du monde dans lequel il se trouve, ce qui lui permet d'interpréter et d'agir selon l'évolution des phénomènes que subit son environnement. Nous présentons dans les sections suivantes une brève description de l'architecture de l'agent que nous appelons modulaire, parce qu'elle est conçue tout simplement par un assemblage de module. Nous détaillons dans le chapitre 5.3 les relations ainsi que les différentes interactions entre les modules.

4.3.1 Architecture cognitive de l'individu

Nous proposons une architecture générale de l'agent (figure 4.4), inspirée des architectures agent telles que proposées dans la littérature [43, 47, 140]. Chaque agent dans notre modèle est immergé dans un environnement dans lequel et avec lequel il interagit, d'où une structure définit par trois fonctions principales : percevoir, décider et agir. Nous optons pour une architecture agent qui hérite du modèle « Croyance-Désir-Intention » *BDI* « *Befiels-Desire-Intention* ». Elle est composée de trois principaux modules gérant les trois principaux états mentaux qui sont les croyances, les désirs et les intentions. Nous intégrons aussi trois autres modules à savoir un module de perception, un module de raisonnement et pour finir un module émotionnel partant du postulat que la prise de décision est dépendante de l'émotion (section 3.3).

Chaque agent A_i du modèle peut être écrit sous la forme d'un ensemble de module : $X(A_i) = \{C_i; D_i; I_i; P_i; E_i; R_i\}$, avec C_i le module des croyances, D_i le module des désirs, I_i le module des intentions, P_i le module de perception, E_i le module des émotions et R_i le module de raisonnement.

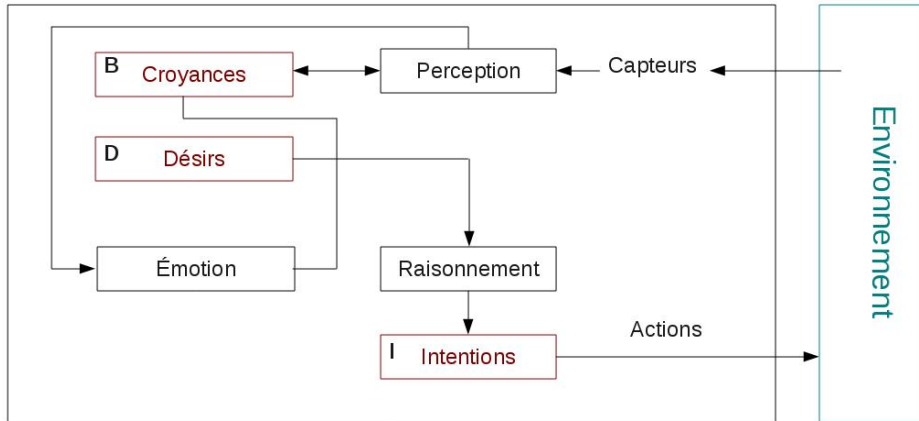


FIGURE 4.4: Architecture cognitive de l'agent.

Par ailleurs, dans un environnement virtuel très dynamique, l'agent autonome que nous modélisons est confronté à deux types de problèmes sensorielles. Premièrement, il doit avoir un regard partiel ou complet sur son environnement externe pour une interaction optimale avec ce dernier. Deuxièmement, il doit interagir avec ses stimuli internes qui expriment ses tendances, ses émotions et ses désirs. En effet, l'architecture de l'environnement présentée dans la section 4.2 permet à l'agent d'identifier et de mettre à jour son état interne ainsi que l'état de son environnement. C'est grâce aux requêtes du module de perception que le modèle d'environnement peut non seulement fournir les données brutes sensorielles (*i.e* par l'intermédiaire des capteurs de l'agent), mais aussi l'interprétation des situations perçues, ce qui est à juste titre important et utile pour un individu.

Nous pouvons classer alors les différents types d'informations en provenance de l'environnement en deux grandes classes d'informations :

- Informations permettant d'identifier l'état de l'environnement externe de l'agent.
- Informations permettant d'identifier l'état interne de l'agent.

Environnement externe

Dans la réalité un individu est capable de se situer dans un environnement en combinant les informations en provenance des objets présents dans son voisinage, de son contexte spatio-temporel et ses connaissances antérieures. Dans un but d'approcher le comportement des agents virtuel aux individus réel, l'agent de notre modèle

4. Méthodologie et éléments d'une démarche de modélisation du phénomène de panique dans les mouvements de foule

est capable d'interroger son environnement par l'intermédiaire de requêtes, ce qui lui assure une identification de sa position dans l'espace ainsi que celle de ses voisins qu'ils soient d'autres agents ou des obstacles et aussi une identification d'un danger et son degré de dangerosité. Ces informations sont utilisées pour mettre à jour les connaissances de l'agent (section 4.3.2) et elles permettent par la suite à l'agent de décider des comportements de navigation employés (*e.g* modification de la trajectoire suite à la perception d'un obstacle fixe).

État interne

L'évolution de l'environnement de l'agent est directement affectée par l'évolution des comportements des agents qui le constituent. En effet, la variation de l'état interne de l'agent du modèle, qu'elle soit physique telle que sa position, psychologique tel que son état émotionnel, ou un besoin social tel qu'un besoin de suivre les autres pour évacuer, a des conséquences directes sur son comportement. L'environnement induit alors une évolution de l'état interne de l'agent en provoquant la modification de ses désirs (section 4.3.2) et éventuellement de ses intentions (section 4.3.2).

Nous proposons dans ce qui suit une description de chacun des différents modules de l'architecture agent du modèle.

4.3.2 La structure *BDI*

Les croyances

Dans un univers agent, chaque agent détient des connaissances sur lui-même, sur les autres et sur son environnement courant. Ces connaissances ne sont pas nécessairement objectives, c'est pour cela qu'on parle généralement de croyances de l'agent.

Par sa capacité de perception ou par interaction avec les entités de son entourage, un agent doit mettre à jour ses croyances, il doit être en mesure d'identifier à chaque instant ses relations avec les autres agents et objets de son environnement, ainsi que l'évolution du degré de dangerosité d'une perturbation. Nous proposons une représentation des croyances fondée sur deux composantes à savoir les croyances agent CA_i et les croyances culturelles CC_i , on note ainsi les croyances $C_i = \{CA_i; CC_i\}$.

CA_i représente l'ensemble des attributs de l'agent permettant sa description dans l'environnement. Chaque agent A_i est ainsi localisé dans un espace physique Evt dans le quel il se déplace en présence d'obstacles O et selon un itinéraire reliant des points de décision P qui sont le centre des régions issus de la structuration de l'environnement (section 4.2). Cet itinéraire correspond au plus court chemin en

fonction d'un couple origine/destination et est calculé pour chaque agent A_i selon le graphe d'adjacence, pré-déterminé et partagé par tous les agents du modèle à l'initialisation de l'environnement. Chaque agent est ainsi décrit par un ensemble d'attributs $X(A_i) = \{Pos_{(x,y)}(t); \theta_{(x,y)}(t); V_{(x,y)}(t); \phi_{(x,y)}(t); \delta_{(x,y)}(t); D_i; D_k\}$ avec :

- $Pos_{(x,y)}(t)$ les coordonnées x et y à l'instant t ;
- $\theta_{(x,y)}(t)$ l'orientation à l'instant t ;
- $V_{(x,y)}(t)$ la vitesse à l'instant t ;
- $\phi_{(x,y)}(t)$ le champ de vision à l'instant t ;
- $\delta_{(x,y)}(t)$ le champ d'action à l'instant t ;
- D_i la distance de confort par rapport aux autres agents ;
- D_k la distance de confort par rapport aux objets fixes de l'environnement ;

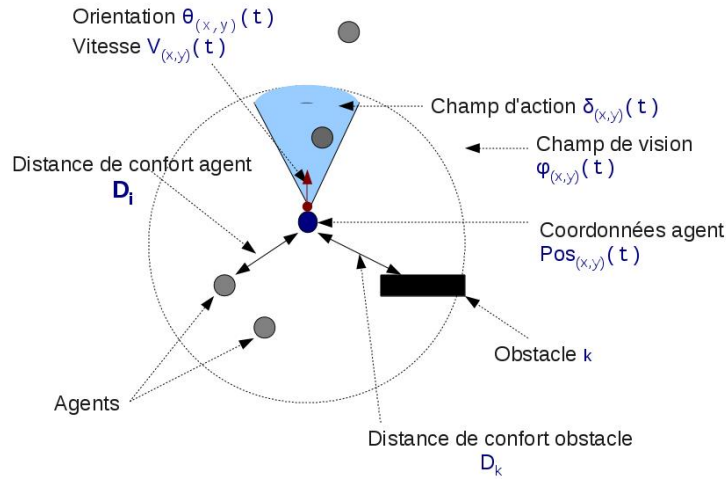


FIGURE 4.5: L'ensemble des attributs d'un agent.

En général, les croyances agent CA_i évoluent au fur et à mesure que l'agent recueille des informations venant du monde qui l'entoure. Sur cette base, chaque agent met à jour à chaque instant t sa position $Pos_{(x,y)}(t) \rightarrow Pos_{(x,y)}(t+1)$, en fonction de son orientation $\theta_{(x,y)}(t)$ et sa vitesse $V_{(x,y)}(t)$ et évidemment en tenant compte des différentes contraintes et opportunités rencontrées localement. Plus précisément, l'orientation de chaque agent dépend de la localisation de son prochain point de décision P_n , de la présence d'obstacles et/ou d'agents dans son champ de vision .

Les croyances culturelles CC_i définissent les connaissances que déient un agent

4. Méthodologie et éléments d'une démarche de modélisation du phénomène de panique dans les mouvements de foule

par rapport à certains objets et stimuli de l'environnement. Ils permettent par exemple à l'agent d'identifier la dangerosité d'une perturbation selon sa connaissance sociale et culturelle.

Les désirs

Les désirs représentent des états que l'agent souhaite pouvoir réaliser tel qu'échapper à un danger ou trouver un membre de la famille dans la foule. Une fois que l'agent a sélectionné les désirs qu'il souhaite satisfaire en premier, ces derniers se transforment en but. Afin de faciliter la modélisation de l'agent, nous assimilons les désirs aux buts, pour cela nous définissons une base de désir contenant les buts réalisable par un agent.

Les intentions

Les intentions sont génératrices de comportements dans l'environnement. Elles définissent en effet le plan d'action de l'agent, c'est-à-dire l'ensemble des actions que doit effectuer un agent pour accomplir un ou plusieurs désirs. Dans le modèle mis en œuvre, nous définissons une base contenant un plan d'action pour chaque désir de l'agent (figure 4.4). Nous prenons aussi en compte le fait qu'un plan peut contenir d'autres plans, car par exemple le plan *sortir de l'immeuble en feu* peut inclure le plan *sortir de la pièce*.

4.3.3 Les modules

Le module de perception

Notre agent autonome a besoin de percevoir son environnement afin d'acquérir les connaissances nécessaires lui permettant d'atteindre ses objectifs. Le modèle de l'environnement présenté dans la section 4.2 assure justement à l'agent une perception nette du monde extérieur. Grâce à son architecture hiérarchique il peut non seulement fournir les données brutes captées mais aussi le chemin amenant à une destination, ce qui est très important et utile pour un agent.

La perception interagit avec les croyances, ce qui permet à l'agent de classer et de distinguer les états du monde qui l'entourent, à la fois en fonction des traits saillants de l'environnement, mais aussi en fonction des stimuli internes de ce dernier. C'est en véhiculant les tendances, les désirs et les connaissances que les stimuli internes d'un agent assurent le déclenchement d'une émotion appropriée à la situation. Nous proposons une architecture du module de perception composée de trois sous-modules (figure 4.6) : la sélection, le décodage et l'interprétation, permettant ainsi une identification plus nette du fonctionnement de ce processus.

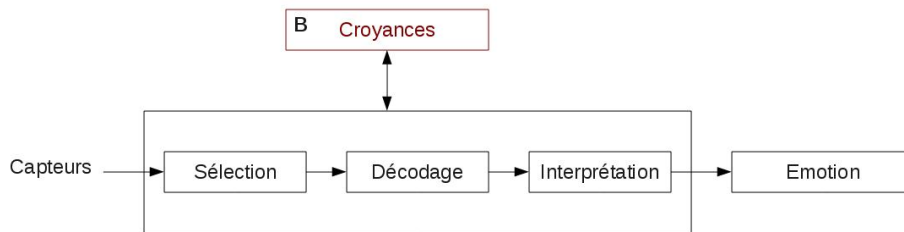


FIGURE 4.6: Module de perception.

- La sélection assure un recueil des informations en provenance de l'environnement virtuel ;
- Le décodage permet de traiter les informations recueillies. Il interagit avec la base de connaissance de l'agent pour identifier les objets perçus ainsi que leurs attributs ;
- L'interprétation établit une représentation subjective de l'environnement de l'agent sous la forme d'un ensemble entités et relations.

Le module émotionnel

Le module émotionnel est au centre de notre approche de modélisation. C'est une partie intégrante du module de raisonnement (section 3.3.3) qui apporte une cohérence au niveau des comportements de l'agent concernant notre démarche de modélisation des phénomènes de panique. Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons principalement à la modélisation du déclenchement de l'émotion afin de déterminer les circonstances dans lesquelles ces dernières apparaissent. Nous insistons par ailleurs sur l'influence de la personnalité sur les émotions et des émotions sur les relations sociales. Nous nous appuyons dans notre approche de modélisation de l'émotion sur la théorie de l'évaluation cognitive (section 3.3.3) selon laquelle une émotion se déclenche par une évaluation subjective d'un événement. Nous proposons pour ce fait une architecture du module émotionnel basée sur le modèle *Sequential Check Theory of Emotion Differentiation* de Scherer [116].

4. Méthodologie et éléments d'une démarche de modélisation du phénomène de panique dans les mouvements de foule

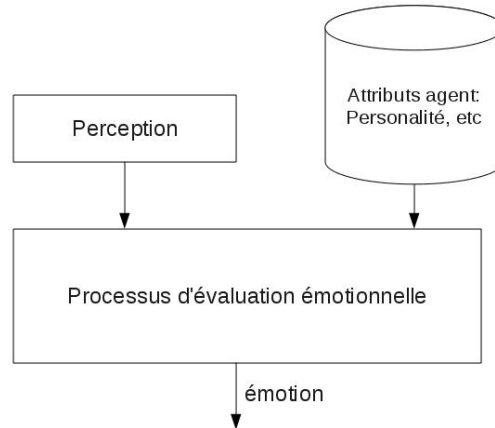


FIGURE 4.7: Le module émotionnel.

Le module de raisonnement

La cohérence des comportements d'un agent virtuel implique une modélisation réaliste de son processus de raisonnement et plus particulièrement de son processus d'évaluation (section 3.3.3). Nous nous orientons vers cette optique de modélisation afin de s'assurer de la cohérence des comportements des individus virtuels suite aux variations de l'environnement.

Même si tous les désirs d'un agent sont consistants, ce dernier n'est pas capable de satisfaire tous ses désirs à la fois. Il doit alors décider des désirs à retenir et à satisfaire en premier. Cette idée est au cœur de l'approche de raisonnement *BDI*, elle essaye de reproduire le processus de raisonnement qu'un humain réalise, en décidant à chaque instant de ce qu'il doit faire en premier selon les circonstances. Nous proposons pour cela un module de raisonnement divisé en deux sous-modules :

- Module de classification des buts : il assure une sélection des buts à réaliser en premier selon les variations de l'environnement.
- Module de planification : il assure une planification des actions permettant de satisfaire le but sélectionné.

Nous adoptons une stratégie qui utilise des primitives s'appuyant sur des comportements réactifs comme une base de construction, et qui évoluent suivant les besoins en proposant des comportements plus complexes. Nous développons ainsi des routines de comportement réactif qui couvrent quelques situations qu'un agent du modèle est amené à rencontrer. Ces routines couvrent les aspects réactifs des

4.4. Modélisation de la panique et de son processus de propagation

déplacements tels que l'arrêt, l'avancement et l'accélération, facilitant ainsi la mobilité d'un agent.

Le module de raisonnement (figure 4.8) permet ainsi d'identifier les intentions de l'agent, d'orienter ses comportements, tout en lui assurant une certaine cohérence dans les choix effectués.

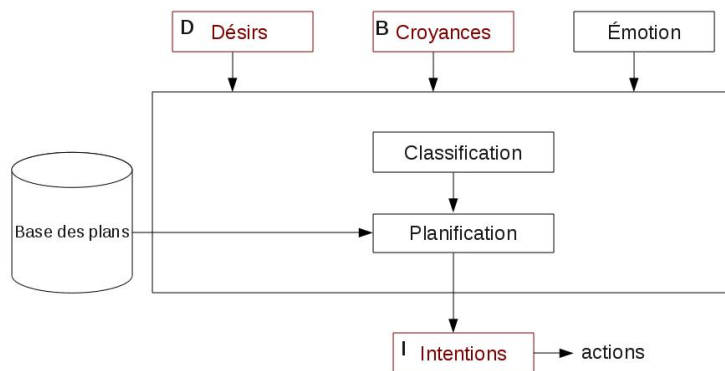


FIGURE 4.8: Module de raisonnement.

4.4 Modélisation de la panique et de son processus de propagation

*« Dans ce moment de panique,
je n'ai peur que de ceux qui ont peur. »*

Victor Hugo

Le mythe du dieu Pan, stipule que la panique est due à un mal qui vient de l'extérieur. Le dieu Pan étant le coupable, c'est le bouc émissaire en quelque sorte. Les études actuelles sur la panique dans les situations de catastrophe s'inscrivent dans la droite lignée du mythe. Le coupable est cependant devenu technique tel qu'un incendie, imaginaire telle qu'une rumeur, ou bien un événement normal qui dégénère en catastrophe telle qu'une bousculade dans un stade. Mais quelles que soient les causes que nous pouvons identifier, la panique demeure synonyme de peur, d'un mal qui vient de l'extérieur. Les études en sociologie et en psychologie considèrent

4. Méthodologie et éléments d'une démarche de modélisation du phénomène de panique dans les mouvements de foule

en effet la panique comme une sensation de peur intense qui domine l'individu et rend ses décisions irrationnelles selon l'école de pensée Française ou de rationalité limitée selon l'école de pensée Américaine (section 3.2.1).

Lorsque la panique apparaît dans une foule, sa propagation devient inévitable, c'est d'ailleurs cette propagation qui suscite de plus en plus l'intérêt des chercheurs dans diverses disciplines. Les deux écoles de pensée Française et Américaine divergent également sur ce point. En effet, l'école Française défend l'idée d'une propagation par imitation irrationnelle comparable à une « épidémie psychologique », pour reprendre les termes de Karl Jaspers, alors que l'école Américaine défend l'idée d'une propagation résultat d'une imitation rationnelle. Ce que désigne Quarantelli par une activation du sentiment d'impuissance chez l'individu, provoquant l'amorce de la panique chez ce dernier et par la suite sa propagation par interaction sociale au niveau de la foule. La pensée Américaine considère que la propagation de la panique dans la foule s'effectue lorsque les individus en état de peur prennent conscience que les autres sont aussi impuissants qu'eux, la panique devient alors la seule émotion probable.

En dépit de ces divergences les deux écoles se rejoignent sur deux points essentiels : le sentiment de peur comme origine de la panique et l'interaction sociale comme élément de sa propagation. Nous nous fondons alors sur ces deux critères pour modéliser les phénomènes de panique dans les mouvements de foule, ce qui nous permet de modéliser l'amorce de la panique par un accroissement de la sensation de peur chez l'individu et sa propagation par une certaine transmission due aux interactions sociales.

Revenant à l'expression de Karl Jaspers « la panique est une forme d'épidémie psychologique ». Cette vision rend la panique similaire à une maladie dont la propagation est très significative ce qui lui donne le caractère épidémique. L'analogie avec une maladie contagieuse dont le vecteur est l'être humain est alors très forte, la panique se contracte par interaction entre un individu sain et un individu infecté. Nous partons de cette idée de considérer la panique comme une maladie à caractère épidémique pour modéliser le processus de propagation de cette dernière dans une foule.

L'épidémiologie s'intéresse essentiellement à la variation du nombre de malades en fonction du temps et éventuellement de l'espace. Ce qui implique que les modèles épidémiologiques sont essentiellement des modèles dynamiques qui permettent de suivre la dynamique des états cliniques des individus hôtes. Pour ce faire, les modèles compartimentaux sont parfaitement adaptés, ils fournissent un cadre idéal pour la conceptualisation et la simulation de la propagation d'une maladie dans une

4.4. Modélisation de la panique et de son processus de propagation

population. Ils consistent à diviser la population hôte en autant de sous-populations « compartiments » que d'état clinique et à connecter les compartiments entre eux par l'intermédiaire de flux d'individus. Ces modèles facilitent l'application des lois et des règles, ce qui permet par conséquent une meilleure évaluation de l'efficacité des mesures d'intervention, ainsi qu'une estimation optimale de l'ampleur, de la durée et de l'expansion géographique d'un foyer. Divers modèles sont présents dans la littérature, nous présentons dans les sections suivantes deux modèles compartimentaux à savoir le modèle Hamer, le modèle compartimental le plus simple, et le modèle de Kermack et McKendrick que nous dérivons pour le problème qui nous concerne.

4.4.1 Le modèle déterministe de Hamer : modèle SI

Le modèle de Hamer, apparu en 1960, est le premier modèle dynamique d'étude épidémiologique. Hamer propose une décomposition d'une population N en deux compartiments :

- Les individus susceptibles d'être infectés (S) ;
- Les individus infectés (I).

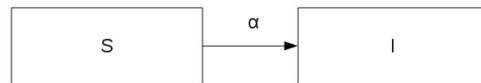


FIGURE 4.9: Diagramme de transmission du modèle SI.

L'infection se propage par contact direct entre ces deux populations selon un taux d'infection α , qui est un facteur de proportionnalité car un contact n'entraîne forcément pas une contamination. Le modèle est décrit par le système différentiel suivant, avec $N = S + I$:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt}(t) = -f(S(t), I(t)) \\ \frac{dI}{dt}(t) = f(S(t), I(t)) \end{cases} \quad (4.1)$$

avec $f(S, I)$ est l'*incidence* de la maladie, c'est à dire le taux avec lequel l'infection se produit. La figure 4.9 montre le diagramme de transmission de la maladie, le modèle le plus simple est le cas où $f(S, I) = \alpha SI$. On a alors le système différentiel

4. *Méthodologie et éléments d'une démarche de modélisation du phénomène de panique dans les mouvements de foule*

suivant :

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt}(t) = -\alpha SI \\ \frac{dI}{dt}(t) = \alpha SI \end{cases} \quad (4.2)$$

or comme $N = S + I$ on peut écrire le système ainsi :

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt}(t) = -\alpha S(N - S) \\ \frac{dI}{dt}(t) = \alpha S(N - S) \end{cases} \quad (4.3)$$

Ce qui donne des équations différentielles de type logistique, introduit initialement par Verhulst pour décrire un modèle d'évolution de population. Le modèle de Hamer est un modèle déterministe simple dont la courbe épidémiologique, de forme symétrique, ne correspond pas à la réalité en épidémiologie. C'est pour cela que ce modèle n'est pas souvent utilisé pour l'analyse et l'étude des problèmes épidémiologique [33].

4.4.2 **Le modèle déterministe de Kermack et McKendrick : Le modèle SIR**

Le modèle SIR de Kermack et McKendrick est un modèle déterministe d'étude de la propagation d'une maladie contagieuse dans un environnement fermé. Il a été proposé pour expliquer la variation du nombre d'individus infectés observés pour une épidémie comme la peste (Londres entre 1665 et 1666, Bombay entre 1905 et 1906) et le choléra (Londres en 1865). Kermack et McKendrick partagent la population en trois compartiments S susceptibles, I infectés et R rétablis. La transmission de la maladie est représentée par un flux d'individus du compartiment susceptibles S au compartiment infectés I selon un taux de transition β appelé aussi taux de contact infectieux, taux de transition efficace ou taux de contact effectif. La contamination est liée à de nombreuses variables telles que la nature de l'infection, la durée d'une contagion, le nombre d'individus de la population et bien d'autres variables. Le rétablissement des individus infectés est représenté par une migration des individus du compartiments infectés I au compartiment rétablis R selon un taux de rétablissement γ .

Le modèle SIR est un modèle compartimental simple dont la population étudiée est homogène de taille constante et où les paramètres de transition β et γ sont déterminés à partir des données concernant la maladie traitée.

4.4. Modélisation de la panique et de son processus de propagation



FIGURE 4.10: Diagramme de transmission du modèle SIR.

La figure 4.10 représente le digramme de transition du modèle SIR, dont la mise en équations est la suivante :

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt}(t) = -\beta I(t)S(t) \\ \frac{dI}{dt}(t) = \beta I(t)S(t) - \gamma I(t) \\ \frac{dR}{dt}(t) = \gamma I(t) \end{cases} \quad (4.4)$$

La force d'infection

L'expression $\beta I(t)$ est appelé la force d'infection λ , elle rend compte du processus de contamination en exprimant la probabilité qu'un individu susceptible d'être infecté contracte la maladie. C'est le paramètre clé du modèle épidémiologique, il définit le processus de contamination en exprimant la probabilité qu'un individu susceptible d'être infecté contracte la maladie. C'est d'ailleurs cette force qui assure la transition des individus du compartiment S au compartiment I sur la figure 4.10. Ainsi $\beta I(t)S(t)$ définit donc le nombre total d'individu susceptible qui contractent la maladie en contact de la population des infectés.

Propriétés à l'équilibre

Le modèle SIR permet de répondre à une question fondamentale en épidémiologie, qui est de savoir s'il va y avoir une épidémie ou pas. L'examen des équations différentielles du système nous permet de définir le système ainsi :

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt}(t) = -\beta I(t)S(t) \\ \frac{dI}{dt}(t) = \beta I(t)S(t) - \gamma I(t) \end{cases} \quad (4.5)$$

4. *Méthodologie et éléments d'une démarche de modélisation du phénomène de panique dans les mouvements de foule*

puisque le nombre de la population N est constant, d'où $N = S(t) + I(t) + R(t)$. Une épidémie implique que le nombre de malades dans le compartiment I augmente, c'est à dire qu'il y'a plus de nouveaux malades que de nouveaux guéris, ce qui à partir de l'équation 4.5 nous permet d'écrire :

$$\beta I(t)S(t) - \gamma I(t) > 1 \quad (4.6)$$

Ce qui revient à écrire $\beta I(t)S(t) > \gamma I(t)$, on obtient alors la condition pour qu'il y ait une épidémie :

$$\mathfrak{R} = \frac{\beta S(t)}{\gamma} > 1 \quad (4.7)$$

L'expression $\frac{\beta S(t)}{\gamma}$ s'appelle *le taux de reproduction* ou *le théorème de seuil*, ce qui constitue un résultat fondamentale en épidémiologie. On utilise souvent sa valeur initiale $\mathfrak{R}_0 = \frac{\beta N}{\gamma}$, appelée *le nombre de reproduction de base*, qui détermine le nombre d'infections secondaires suite à l'introduction d'un individu infecté dans une population constituée entièrement par des individus susceptibles [4].

Modèle de mobilité et modèle émotionnel

5.1	Introduction	95
5.2	Modélisation de l'environnement	96
5.2.1	Génération de la structure Quadtree et du graphe d'adjacence	96
5.2.2	Planification de la trajectoire	101
5.3	Approche cognitive de modélisation	105
5.3.1	Perception et comportement réactif	105
5.3.2	L'approche émotionnelle de modélisation	112
5.3.3	Modèle de l'émotion	118
5.3.4	Mobilité et interaction entre composantes	126

5.1 Introduction

La mobilité humaine correspond à un déplacement d'un lieu à un autre et génère une trajectoire. Elle constitue un élément essentiel du comportement humain et se traduit par des flux qui se matérialisent dans un environnement physique. Les mouvements des individus entraînent des modifications dans le flux de déplacement ce qui en retour induit une variation des relations entre les différentes entités de l'environnement. Ceci s'accompagne d'une variation de l'organisation spatiale, ainsi que des redéfinitions des relations inter-individus et entre ces individus et les différents objets qui les entourent.

Modéliser les comportements de mobilité implique donc une représentation élaborée de l'environnement ainsi que de celle des individus à simuler. Nous détaillons dans la première partie de ce chapitre notre démarche de modélisation de l'environnement. Nous appliquerons par la suite cette représentation de l'espace à notre modèle d'agent cognitif.

5.2 Modélisation de l'environnement

Une des plus importantes caractéristiques que doit avoir un agent est la planification de sa trajectoire de déplacement (*i.e* où il va et comment), cette planification devant être éventuellement adaptative. En effet, il doit pouvoir naviguer dans son environnement de façon autonome. Ce qui nécessite de concevoir une représentation abstraite efficace de l'environnement. Comme nous l'avons indiqué dans la section 4.2, nous représentons l'environnement virtuel des agents selon deux couches : une première couche qui représente l'espace sous forme d'objets appartenant à des classes d'objets prédéfinis et une deuxième couche qui est une discrétisation de la première couche selon l'approche de segmentation en région. Cette structuration de l'environnement nous fournit un graphe d'adjacence des régions qui permet de faciliter le stockage et la récupération des informations de l'environnement et optimise l'élaboration du plan de navigation des agents suivant un algorithme de recherche du plus court chemin.

5.2.1 Génération de la structure Quadtree et du graphe d'adjacence

Notre algorithme de modélisation génère automatiquement un Quadtree pour tout environnement virtuel décrit sous forme géométrique plane. La structure obtenue contient des informations permettant à l'agent de faciliter l'établissement de son plan de mobilité, ainsi que l'amélioration de sa capacité de perception du monde qui l'entoure.

L'algorithme procède ainsi en deux grandes étapes :

- création du Quadtree ;
- création du graphe d'adjacence.

La structure Quadtree

L'algorithme commence tout d'abord par récupérer la liste des différents objets présents dans l'environnement des agents (*e.g* porte, mur, table, *etc*), et les identifie selon un certain nombre de paramètres tel que la forme et la couleur. Par la suite, un processus itératif de décomposition débute (algorithme 1 et 2), permettant la division de chaque région de l'espace en quatre sous-régions tant que la région traitée est partiellement occupée par un objet.

Algorithme 1 : Décomposition

Entrées C_i //La cellule à décomposer
listeObj //liste des objets présents dans l'environnement.
listeAgent //la liste des agents contenus dans C_i

- 1: **si** *estFeuille*(C_i) **alors**
- 2: **si** *profondeur*(C_i) < *profondeurMax*(C_i) et *nombreObjet*(C_i) > 0 et *contenuDansObjet*(C_i) = *Faux* **alors**
- 3: $sub[] \leftarrow subdivision(C_i, listeObj, listeAgent)$ //*sub[]* contient les sous cellules d'une cellule donnée
- 4: **pour tout** C_k de *sub[]* **faire**
- 5: *Decomposition*(C_k)
- 6: **fin pour**
- 7: **fin si**
- 8: **sinon**
- 9: $div \leftarrow nbDivision(C_i)$ //récupération de nombre de décomposition de la cellule, 4 pour le Quadtree
- 10: $nbFeuille \leftarrow nombreFeuille(C_i)$
- 11: **si** $nbFeuille = div$ **alors**
- 12: *Fusion*(C_i)
- 13: **fin si**
- 14: **fin si**

Algorithme 2 : Subdivision

Entrées C_i //la cellule à subdiviser
Entrées *listeObj* //la liste des objets contenus dans C_i
Entrées *listeAgent* //la liste des agents contenus dans C_i

- 1: $div \leftarrow nbDivision(C_i)$
- 2: **pour** $k = 1$ **jusqu'à** div **faire**
- 3: $sub[k] \leftarrow ConstruireCellule()$ //construction d'une cellule C_k
- 4: *contientObjet*(C_k) //mise à jour du nombre d'obstacle dans la cellule C_k
- 5: *contientAgent*(C_k) //mise à jour du nombre d'agent dans la cellule C_k
- 6: **fin pour**
- 7: **return** *sub[]* //tableau contenant l'ensemble des sous cellules de la cellule C_i

A l'issue de cette phase de décomposition, nous obtenons une structure hiérarchisée qui permet d'établir des relations de proximité entre les différentes régions. A la suite de cette phase, l'algorithme entame la phase de fusion durant laquelle nous obtenons un nombre minimal de régions connexes.

5. Modèle de mobilité et modèle émotionnel

Le Quadtree obtenu contient ainsi :

- La liste des sous-régions, sous forme de cellules C_i , qui forment l'environnement des agents ;
- La cellule initiale (racine) C_0 qui représente l'environnement avant la segmentation ;
- La profondeur maximale de décomposition de l'environnement.

Et chaque cellule C_i contient des variables indiquant :

- La profondeur de la cellule dans le Quadtree ;
- Les coordonnées du centre de la région couverte par la cellule ;
- La cellule parent issue de laquelle dérive la cellule C_i ;
- L'ensemble des cellules filles (*i.e* les sous régions) ;
- La liste des agents présents dans la cellule ;
- La liste des obstacles fixes présents dans la cellule.

La figure 5.1 représente la géométrie initiale de l'environnement virtuel des agents en trois dimensions. Sa représentation en deux dimensions est illustrée par la figure 5.2 en (a) et sa décomposition en Quadtree en (b). Les régions de l'environnement sont décomposées selon les classes d'objets prédéfinis (*i.e* les murs (en bleu) dans ce cas).

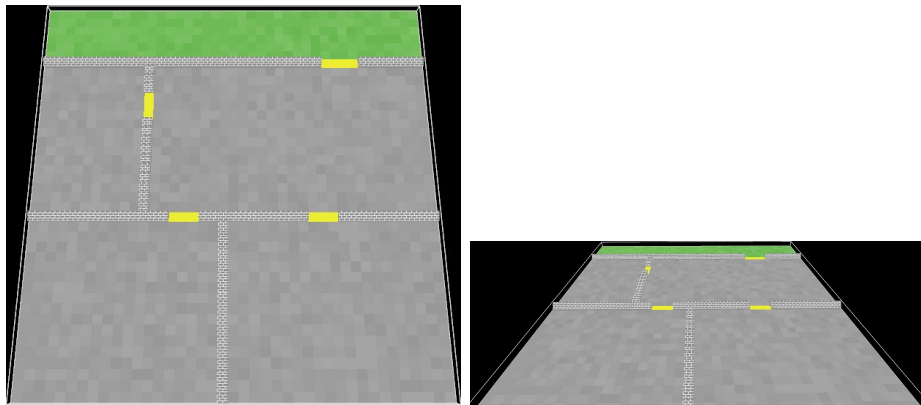


FIGURE 5.1: Représentation de l'environnement virtuel des agents en trois dimensions.

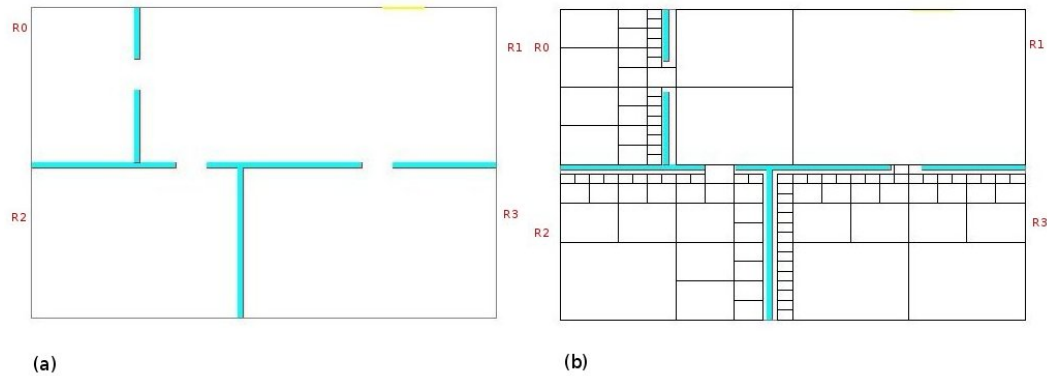


FIGURE 5.2: Représentation de l'environnement virtuel des agents en deux dimensions **(a)**, composé de quatre grands espaces séparés par des murs (en bleu) et d'une seule sortie (en jaune). Le Quadtree **(b)** représente la segmentation en région de l'environnement virtuel. Les régions R0, R1, R2 et R3 sont issues de la première itération de la phase de décomposition. Ces dernières seront à leur tour décomposées de façon itérative en quatre sous-régions selon la présence d'objets fixes : les murs dans cet exemple.

Le graphe d'adjacence

Une fois que la segmentation de l'environnement des agents est terminée, nous construisons le graphe d'adjacence où les nœuds du graphe représentent les cellules C_i et les arêtes la relation de voisinage entre ces dernières (algorithme 3).

Le graphe d'adjacence obtenu est un graphe valué dont les nœuds contiennent :

- Les coordonnées x et y de la cellule C_i ;
- Les coordonnées du centre de la cellule C_i ;
- La liste des individus présents dans la cellule.

Et les arêtes représentent la distance $Dist(N, A)$ entre deux nœuds N et A (figure 5.3).

5. Modèle de mobilité et modèle émotionnel

Algorithme 3 : Création du graphe d'adjacence

Entrées Q //le Quadtree issu du processus de décomposition
 GA //Graphe d'Adjacence initial : graphe ne contenant ni nœud ni arc
1: $nbNiveau \leftarrow nbNiveauQuadtree(Q)$
2: **pour tout** C_i de Q **faire**
3: $creerNoeud(GA, C_i)$ //création des nœuds pour toutes les cellules du Quadtree dans GA
4: **fin pour**
5: **pour** $j = 1$ **jusqu'à** $nbNiveau$ **faire**
6: $listeNiveau \leftarrow$ ajout dans la liste les cellules d'un même niveau j
7: $creerArc(GA, listeNiveau)$ // création des arcs dans GA entre les cellules issus d'un même niveau et d'un même parent
8: **fin pour**
9: $creerArcDiffNiveau(GA, Q)$ // création dans GA des arcs entre les cellules de différents parents et de différents niveaux
10: $supprimerArc(GA)$ //suppression de GA les arcs vers des cellules subdivisées
11: $supprimerArcObjets(GA)$ //suppression de GA les arcs vers les cellules contenant un objet

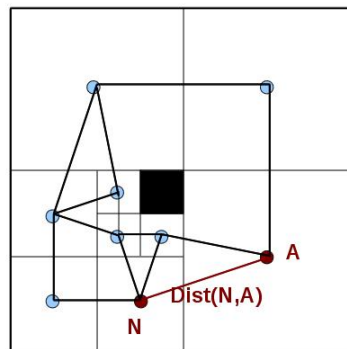


FIGURE 5.3: Le coût des arêtes du graphe d'adjacence est calculé à partir de la distance entre le centre de deux cellules adjacentes du Quadtree.

La figure 5.4 illustre le graphe d'adjacence de l'environnement virtuel ci-dessus. les nœuds du graphe représentent le centre des cellules du Quadtree et les arêtes relient les cellules adjacentes.

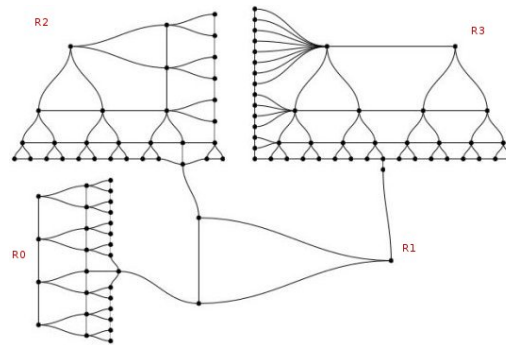


FIGURE 5.4: Le graphe d'adjacence issu de la décomposition en région de l'environnement 5.2.

5.2.2 Planification de la trajectoire

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la planification du chemin est une tâche importante dans notre modèle. L'association du Quadtree et d'un algorithme de recherche comme A^* nous assure une optimisation du calcul du chemin qui mène un agent vers sa destination en prenant par exemple la distance à vol d'oiseau. L'algorithme A^* est un algorithme de planification, souvent utilisé pour sa simplicité et sa faible consommation d'espace mémoire si la fonction heuristique est efficace. Ce point peut s'avérer important si nous considérons un grand nombre d'agents mobiles.

Selon leurs caractéristiques les individus peuvent admettre soit une perception complète ou partielle de leur environnement, un touriste par exemple n'a pas la même représentation de l'environnement qu'une personne habituée des lieux. Nous avons tenu compte de cette particularité dans notre modélisation des agents. En effet, dans la base de connaissance d'un agent, nous intégrons la représentation hiérarchisée de l'environnement dans lequel il évolue, à savoir la structure Quadtree et le graphe d'adjacence. Cette représentation est complète pour un agent ayant une connaissance complète de son espace et incomplète dans le cas contraire.

Concrètement, les agents du modèle partagent tous la même structure Quadtree et le même graphe d'adjacence établis lors de l'initialisation du modèle. Certaines régions du Quadtree et par conséquent certains nœuds du graphe seront inaccessibles dans le cas d'une perception partielle et accessibles dans le cas contraire. De ce fait, un agent élabore son chemin en appliquant l'algorithme de recherche A^* sur son graphe d'adjacence partant de sa position dans l'espace jusqu'à sa destination.

5. Modèle de mobilité et modèle émotionnel

Nous présentons dans ce qui suit les différentes phases du processus de planification de la trajectoire, que nous divisons d'ailleurs en trois sous-tâches :

- **Tâche A**, identification de la région dans laquelle se trouve l'agent du modèle : l'agent entame la recherche de son chemin par la détermination de sa position dans l'environnement. Pour cela, il consulte son graphe d'adjacence qui lui permet d'identifier son nœud de départ ;
- **Tâche B**, identification de la région dans laquelle se trouve la destination : l'agent identifie dans cette phase son nœud destination ;
- **Tâche C**, calcul du chemin le plus rapide entre la position de l'agent et sa destination : après avoir identifié le nœud de départ et le nœud de destination, l'agent procède au calcul de son chemin le plus rapide selon l'algorithme A*. À chaque itération l'algorithme tente de se rapprocher du nœud destination en privilégiant les solutions directement les plus proches de cette dernière, en mettant de côté toutes les autres. Il se dirige en effet vers les chemins directs d'abord, et si ces derniers n'aboutissent pas ou bien s'avèrent mauvais, il examine les solutions mises de côté.

Paramètre de congestion

La congestion des régions est prise en compte dans notre calcul du chemin de l'agent, c'est pour cette raison que nous calculons *le chemin le plus rapide* et non *le chemin le plus court*. Car selon l'encombrement d'une région de l'espace le chemin le plus court n'est pas forcément le meilleur chemin que doit emprunter notre agent. Le facteur de congestion C_i d'un nœud i est ainsi calculé en tenant compte de la capacité du nœud et du nombre d'agent présent dans ce dernier à un instant t . La valeur de congestion est définie dans notre algorithme suivant la fonction suivante (équation 5.1) :

$$C_i = \begin{cases} 0 & \text{si } Nb_i < C_{seuil} \\ Nb_i - C_{seuil} & \text{si } C_{seuil} \leq Nb_i < C_{max} \\ \text{infini} & \text{si } Nb_i \geq C_{max} \end{cases} \quad (5.1)$$

tel que :

- C_{max} définit le nombre maximal d'individu pouvant occuper la surface d'un nœud : $C_{max} = \text{surface du nœud } i / \text{surface qu'occupe un agent}$;
- C_{seuil} définit le seuil de congestion d'un nœud, nous choisissons une valeur seuil égale au $\frac{3}{4}$ de la capacité maximal d'un nœud : $C_{seuil} = C_{max} * \frac{3}{4}$;
- Nb_i le nombre d'individu présent dans un nœud i à un instant t .

Selon cette formulation le coût de congestion d'une cellule est proportionnel à son taux d'encombrement. Ce qui permet d'orienter l'agent vers les zones les moins encombrées, et donc d'optimiser le temps de déplacement.

Identification du chemin de l'agent

La recherche du chemin commence par le nœud de départ en étudiant tous ses voisins et en calculant leur niveau de contraintes. L'algorithme détermine pour cela la distance $Dist(N, V)$ qui sépare le nœud de départ N de chacun des nœuds adjacents V , ce qui est d'ailleurs le coût de l'arête (N, V) du graphe d'adjacence (section 5.2.1). Ensuite il étudie le coût entre chaque nœud adjacent et le nœud destination (F) selon une heuristique h , égale à la somme de la distance de Manhattan entre les deux nœuds et la valeur de congestion du nœud V (équation 5.2). La somme de la distance $Dist(N, V)$ et de l'heuristique h définissent le niveau de contrainte du nœud étudié. L'algorithme choisit alors le nœud de faible niveau de contrainte et l'intègre dans son chemin solution.

$$h(V) = Manhattan(V, F) + C_V \quad (5.2)$$

avec F désigne le nœud destination.

Lors de ses déplacements l'agent consulte sa base de connaissance où sera stocké le chemin calculé par l'algorithme A* et utilisera les coordonnées du centre des nœuds du graphe comme des points de décision pour s'orienter vers sa destination finale.

L'algorithme 5 illustre le processus de calcul du chemin de l'agent A_i partant d'une position de départ $Pos_{(x,y)}$ vers une destination de coordonnées (x', y') .

Algorithme 4 : Calcul du chemin d'un agent

Entrées $G(V, E)$ // Graphe d'adjacence G de sommets V et d'arêtes E
 A_i // Agent A_i de position $Pos(x, y)$
 (x', y') // Coordonnées de la destination

- 1: $depart \leftarrow noeudDepart()$ // Recherche du nœud position de l'agent A_i
- 2: $destination \leftarrow noeudDestination(x', y')$ // Recherche du nœud destination de l'agent A_i
- 3: $Oouvert \leftarrow depart$ //Liste des sommets à explorer
- 4: $Ferme \leftarrow \emptyset$ //Liste des sommets visités
- 5: $trouve \leftarrow Faux$
- 6: $g(depart) \leftarrow 1$
- 7: **si** $depart$ correspond à $destination$ **alors**
- 8: $trouve \leftarrow Vrai$
- 9: **fin si**
- 10: **tant que** $Oouvert$ n'est pas vide et $trouve$ est $Faux$ **faire**
- 11: $sommet \leftarrow recupererSommet(Oouvert)$ //récupération du sommet de la liste ouvert
- 12: $adjacent \leftarrow listeAdjacent(sommet)$ // génération de la liste des nœuds adjacent au nœud $sommet$
- 13: **si** $destination$ existe dans $adjacent$ **alors**
- 14: $trouve \leftarrow Vrai$
- 15: **sinon**
- 16: $sommet \leftarrow depiler(Oouvert)$
- 17: $empiler(sommet, Ferme)$
- 18: **pour tout** N dans $adjacent$ **faire**
- 19: **si** N n'est ni dans $Oouvert$ ni dans $Ferme$ **alors**
- 20: $k(sommet, N)$ // le coût entre le nœud $sommet$ et le nœud N
- 21: $g \leftarrow g(sommet) + k(sommet, N)$ //Coût depuis le nœud $depart$
- 22: $f \leftarrow g + h(N)$ //coût vers le nœud $destination$
- 23: $pere(N) \leftarrow sommet$
- 24: **sinon**
- 25: $P \leftarrow pere(N)$
- 26: $compare \leftarrow (g(sommet) + k(sommet, N)) - (g(P) + k(P, N))$
- 27: **si** $compare < 0$ **alors**
- 28: //le passage par le nœud $sommet$ est moins couteux que le nœud P déjà identifié
- 29: $g \leftarrow g(sommet) + k(sommet, N)$
- 30: $f \leftarrow g(N) + h(N)$
- 31: $pere(N) \leftarrow sommet$
- 32: **fin si**
- 33: **fin si**
- 34: **fin pour**
- 35: **fin si**
- 36: **fin tant que**

```

1: si adjacent n'est pas vide alors
2:   ordonner(adjacent) //ordonner la liste des nœuds adjacents selon un ordre
   croissant de la valeur de f
3:   pour tout N dans adjacent faire
4:      $N \leftarrow \text{depiler}(\text{adjacent})$ 
5:     empiler(N, ouvert)
6:   fin pour
7: fin si
8: si trouve est vrai alors
9:   calculer et afficher le chemin solution (récupérer les pere de N jusqu'au
   nœud depart)
10: fin si

```

5.3 Approche cognitive de modélisation

Donner de l'autonomie aux individus virtuels pose le problème relatif à la conception d'un modèle agent dans un environnement complexe. Notre approche de modélisation tend à permettre de concevoir des individus autonomes pouvant interagir avec leurs environnements respectifs et s'adapter aux variations de ces derniers. Comme nous l'avons présenté dans le chapitre 4.3, les agents de notre modèle sont dotés de certaines capacités cognitive permettant l'interaction de ces derniers avec l'environnement, ce qui leur assure un comportement cohérent et proche d'un comportement humain.

L'architecture cognitive des agents du modèle est une architecture modulaire dans laquelle les différents composants communiquent et interagissent. Ces interactions sont très importantes dans le processus comportemental des agents, elles permettent en effet d'analyser l'environnement et de décider des actions à entreprendre, ce qui influe par conséquent sur la mobilité de la foule dans sa totalité. Nous détaillons dans cette partie les relations entre ces différents modules et leurs rôles dans le processus de déplacement des agents.

5.3.1 Perception et comportement réactif

Dans une démarche de modélisation des mouvements d'individus autonomes, nous avons conçu notre modèle du monde de façon à offrir des moyens pour faciliter la localisation et l'orientation de ces derniers dans leur monde virtuel (section 5.2). Le modèle de mobilité que nous présentons fait donc intervenir deux processus : un processus de recherche de chemin et un processus de déplacement d'un individu

5. Modèle de mobilité et modèle émotionnel

dans un environnement complexe. Ces deux niveaux se complètent et interagissent avec l'environnement afin d'assurer une mobilité autonome et cohérente des individus modélisés.

Les agents du modèle se déplacent dans un environnement virtuel composé d'un ensemble de pièces, d'obstacles et de portes que nous pouvons ouvrir et fermer durant la simulation 5.5. Comme nous l'avons détaillé dans la section 5.2, la décomposition de l'environnement en région fournit un graphe d'adjacence qui sera consulté par l'agent tout au long de son déplacement. Chaque agent se déplace donc entre les nœuds du graphe qui forment les points de décision P_n . Lorsqu'un agent arrive à proximité de son point de décision P_n , il cherche à atteindre son prochain point $P_{n+1} : P_n \rightarrow P_{n+1}$. Ce processus de déplacement simple, d'interaction nulle est toutefois perturbé par des facteurs extérieurs à l'agent tels qu'une rencontre avec d'autres agents ou des obstacles ou bien par la perception d'une variation qui affecte la structure de l'environnement. Pour cela l'agent du modèle est amené à analyser son environnement avant toute action afin de garantir une cohérence au niveau de ses comportements.

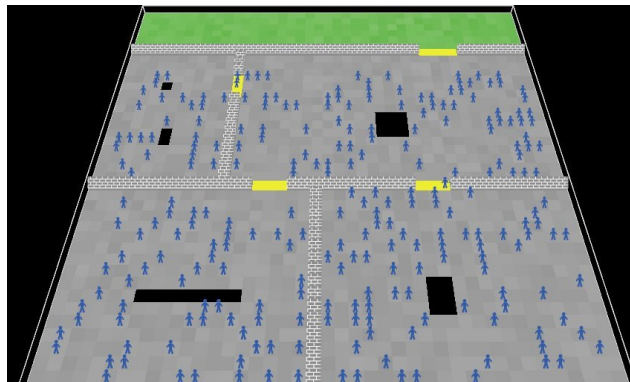


FIGURE 5.5: Un exemple d'environnement virtuel incluant des obstacles (en noir), des portes (en jaune) et une population d'agent.

Chaque agent du modèle entame son processus de déplacement par la détermination d'un éventuel chemin vers sa destination puis par une analyse de son environnement afin de vérifier les règles de déplacement. C'est grâce à ses capacités de perception que l'agent interroge son environnement et collecte toutes les informations lui permettant d'obtenir une représentation subjective de son monde. Par ailleurs, son chemin peut être amené à être modifié selon les informations perçues et les différents contraintes que peut rencontrer un agent lors de ses mouvements. En effet, devant un danger, par exemple, les priorités d'un agent peuvent être modifiées ce qui par conséquent fait varier ses objectifs et donc sa destination.

En absence de toute perturbation négative ou positive, les informations récoltées concernent les objets que rencontre un agent au cours de son déplacement. Dans ce cas, les comportements se limitent à des comportements liant la perception à l'action. Nous adoptons une stratégie qui utilise des primitives de comportements réactifs comme bloc de construction, qui serviront de base par la suite à des comportements plus évolués. Ces primitives permettent aussi la gestion des capacités motrices de l'agent telles que l'avancement, l'accélération, l'attente, *etc* et provoquent la terminaison et le séquençement de ces capacités selon les perceptions de l'agent.

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre 4, le module de perception est décomposé en trois sous-modules, à savoir : la sélection, le décodage et l'interprétation. Ces modules interagissent avec la base de connaissance de l'agent et avec le module de croyance pour identifier les objets se trouvant au voisinage de l'agent et les classer par la suite selon leurs degrés d'influence sur les mouvements de ce dernier. Selon ces perceptions, l'agent peut être amené à exécuter les routines réactives dont nous détaillons le fonctionnement dans ce qui suit.

Routine A, vérification de la nouvelle position : avant tout mouvement, un individu est amené à vérifier la cohérence de sa nouvelle position avec les règles de déplacement du modèle. Il doit ainsi garder une certaine distance de confort D_V par rapport aux autres individus V de son voisinage (équation 5.3, figure 5.6) et une distance D_k par rapport aux objets fixes de son monde. L'agent vérifie dans ce cas la possibilité d'effectuer ce déplacement tout en respectant ses règles de mobilité. Dans le cas où la distance D_V ou D_k n'est pas respectée, l'individu ajuste sa vitesse afin de conserver la distance de confort souhaitée, il peut être amené à s'arrêter si la distance qui le sépare des autres individus ou des obstacles est trop faible. Cette routine est appelée par les routines B, C et D du modèle afin de tester la validité des nouvelles positions calculées.

$$D_V \geq d = \sqrt{(x_I - x_V)^2 + (y_I - y_V)^2} \quad (5.3)$$

5. Modèle de mobilité et modèle émotionnel

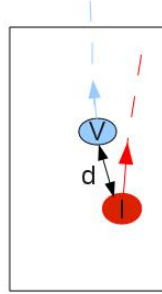


FIGURE 5.6: Distance cartésienne entre l'individu I et un voisin V .

Routine B, évitement de collision avec les objets fixe de l'environnement (figure 5.7) : grâce à sa perception, un agent est capable d'identifier un obstacle se trouvant dans son champ d'action et est capable d'évaluer sa distance ainsi que son degré d'influence sur sa trajectoire. Si l'obstacle présente un risque de collision, l'agent est alors amené à se dévier. Le processus d'évitement consiste à une répulsion d'une distance que nous fixons à 2 unités, puis à 4 unités si l'obstacle présente toujours un risque de collision. Si aucune des deux alternatives ne permet un déplacement respectant les contraintes de mobilité de l'agent (*i.e* absence de collision avec les différentes entités de l'environnement), ce dernier est contraint d'attendre que le chemin se libère pour poursuivre son trajet vers sa destination. Cette attitude comportementale imite celle d'un individu réel, qui consécutivement à la détection d'une potentielle collision avec un obstacle s'écarte de celui-ci d'une certaine distance, faible au départ et l'augmente au fur et à mesure que le risque persiste.

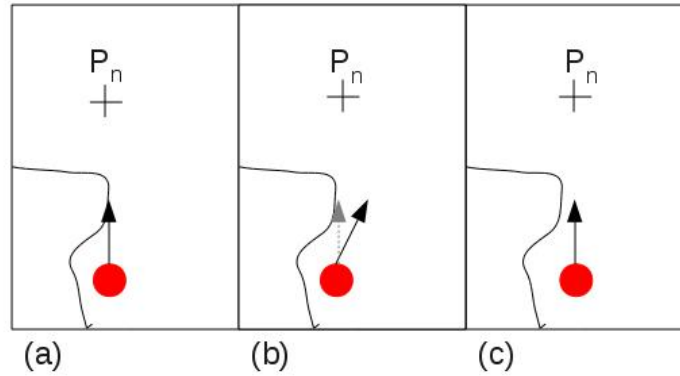


FIGURE 5.7: Évitement des obstacles fixes par un individu du modèle : La figure (a) illustre l'orientation initiale de l'individu vers le point de décision P_n . La figure (b) et (c) montre que consécutivement à la perception d'un obstacle dans le champ d'action, l'individu dévie sa trajectoire puis se réoriente vers P_n .

Pour chaque obstacle rencontré un individu I procède au calcul d'un nouveau vecteur de direction et par conséquent une nouvelle position $Pos_{(xy)}(t_n)$. Nous procédons de la sorte : soit A un point de projection de I sur l'obstacle, nous calculons le vecteur de répulsion de I soit \vec{AI} . Nous déterminons le nouveau vecteur de direction de I , $\vec{ID}' = \vec{IC} + \vec{ID}$. Et enfin nous établissons la nouvelle position $Pos_{(xy)}(t_{n+1})$ de I en tenant compte de son vecteur vitesse $V_{(xy)}(t)$ (figure 5.8).

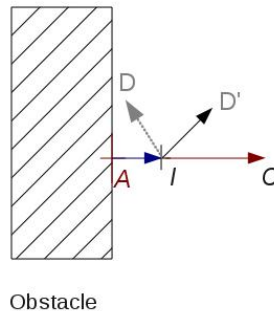


FIGURE 5.8: Calcul de la nouvelle position $Pos_{(xy)}(t_{n+1})$ de l'individu suite à une détection d'un obstacle fixe.

Routine C, évitement de collision avec les individus du voisinage : la modélisation de la mobilité d'un grand nombre d'individus dans un environnement complexe nécessite une gestion efficace de la collision. Afin de réduire ce risque un individu I de notre modèle analyse son voisinage afin de détecter tout conflit avec un voisin V . Nous identifions deux types de danger en extrapolant la trajectoire T d'un individu I avec la trajectoire T' de ses voisins V :

1. Une potentielle collision de face : dans le cas où les deux trajectoires T et T' sont presque parallèles, de sens opposé et que le danger de croisement n'est pas immédiat, un risque de collision de face peut survenir. Car à un instant t_n la distance qui sépare les deux individus peut s'avérer trop faible, ne respectant pas la distance de confort D_i . I doit alors entamer une procédure de résolution de conflit que l'on détaillera par la suite, dans le cas où il obtient la priorité de déplacement, il dévie sa trajectoire et se repousse de V (figure 5.9).
2. Une potentielle collision par croisement : l'extrapolation de la trajectoire T de I et celle d'un individu V peuvent révéler un point d'intersection M , cependant les deux individus peuvent se croiser sans forcément entrer en collision. Pour cela I procède systématiquement à la vérification du risque de collision en tenant compte de sa vitesse ainsi que celle de V , de la distance $dist(I, M)$ qui le sépare du point de croisement M ainsi que la distance $dist(V, M)$ qui sépare V du point M et de sa distance de confort D_i aussi celle de V (figure 5.10). Dans la mesure où une collision est identifiée les deux individus entament une négociation afin de résoudre le conflit de passage.

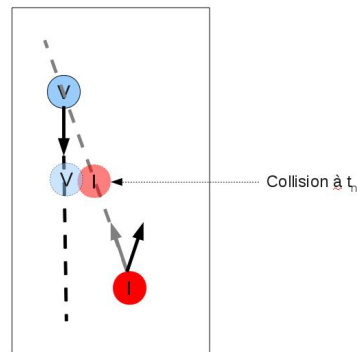


FIGURE 5.9: Détection de collision de face à un instant t_n par extrapolation de trajectoire entre un individu I et son voisin V . I dévie de sa trajectoire initiale afin de respecter sa distance de confort D_i .

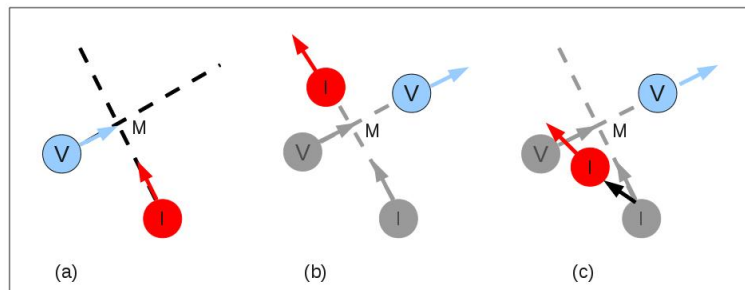


FIGURE 5.10: (a) Détection d'une potentielle collision entre l'individu I et un voisin V à un point M . Deux cas peuvent se présenter suite à l'étude de l'extrapolation des deux trajectoires T et T' : (b) Les deux individus se croisent sans entrer en collision. (c) Le maintien des trajectoires initiales aboutit à une collision, un processus de résolution de conflit est ainsi entamé entre les individus concernés. Dans le cas où I obtient la priorité de déplacement il dévie sa trajectoire et continue son trajet alors que V s'arrête et attend la résolution du conflit ou l'obtention de la priorité de se déplacer.

Routine D, résolution de conflit entre agents : la modélisation de la mobilité d'un grand nombre d'individu dans un environnement fortement dynamique

5. Modèle de mobilité et modèle émotionnel

et complexe peut entraîner l'apparition de conflits et de situations inter-bloquantes qu'il faut résoudre. La routine **C** de notre modèle permet de détecter les conflits avant qu'ils deviennent effectifs, la résolution de conflit est ainsi possible par la capacité des agents à communiquer et à modifier leurs trajectoires. Nous adoptons une approche fondée sur l'anticipation pour résoudre ces conflits de déplacement. Après la prédiction d'une collision, un individu I opère un processus de résolution de conflit avec les voisins concernés. Pour cela, I identifie les voisins ayant la même destination que lui et estime celui le plus proche de la destination. L'individu le plus proche aura donc la priorité de passage sur tous les autres individus. Cependant, dans le cas où les individus en conflit n'ont pas la même destination, l'individu le plus proche de son point de décision P_n aura la priorité de se déplacer. Une fois que l'agent a obtenu la priorité de passage, il dévie de sa trajectoire initiale en se repoussant de ses voisins gênant, puis se réoriente vers sa destination P_n .

5.3.2 L'approche émotionnelle de modélisation

Les agents du modèle sont conçus afin d'être des acteurs autonomes, capables d'analyser leur environnement afin de choisir les actions appropriés en fonction de leurs objectifs. Ces exigences nous ont conduit à adopter une modélisation orientée individu qui prend en compte certains caractères cognitifs essentiels pour un fonctionnement « *de rationalité limitée* » proche du fonctionnement humain.

Les capacités cognitives des individus du modèle permettent à ces derniers de se comporter d'une manière « *réaliste* ». En effet, grâce à leurs capacités de perceptions, leurs émotions et leurs propriétés personnelles, les individus interagissent subjectivement avec leurs environnements. La mobilité de ces derniers est ainsi voisine de celle des humains dans la mesure où elle fait intervenir des propriétés cognitives dans le processus de déplacements. Nous détaillons dans cette section le processus cognitif de nos agents et nous décrivons l'intervention des propriétés cognitives dans l'évolution des routines du comportement réactif (section 5.3.1).

De plus en plus de travaux en neuroscience ou en psychologie cognitive montrent l'importance de l'émotion dans la prise de décision, en particulier en situation de danger. En effet, la prise de décision est un processus très rapide, lorsqu'il s'agit de réagir face à un danger immédiat ou une variation brusque de l'environnement, l'émotion est alors prédominante. La peur, par exemple, est une émotion en réponse à un danger ressenti, elle s'accompagne généralement d'une réaction physiologique (augmentation du rythme cardiaque), d'une réaction faciale (yeux grand ouvert) et surtout d'une tendance à l'action (vouloir fuir le danger). Le déclenchement de cette émotion est le résultat d'une évaluation subjective (*i.e* évaluation cognitive) de la part de l'individu de la situation, jugée par conséquent dangereuse et menaçante.

C'est dans cette logique d'émotion déclenchée que se s'inscrit notre approche de modélisation de l'émotion. En effet, la modélisation du déclenchement d'une émotion nous permettra de déterminer dans quelles circonstances une certaine émotion peut apparaître chez un individu.

Les émotions de base

En 1990 Ontony et Turner distinguent deux conceptions qui suggèrent la classification des émotions en deux catégories : (1) les émotions basiques ou primaires et (2) les émotions non basiques ou secondaires. La première catégorie est fondée sur l'origine évolutive des émotions de base et des primitives psychologiques. Cette catégorie suggère que les émotions de base sont « des constituants irréductibles des autres émotions » [89]. En 1972, à l'issue d'une étude sur les réactions émotionnelles des personnes isolées d'une tribu de Papouasi-Nouvelle-Guinée, le psychologue américain Paul Ekman et son collaborateur Wallace Freisen ont pu affirmer l'existence d'un ensemble d'émotion de base d'origine biologique et universelle à tous les hommes. Ils proposent ainsi un modèle émotionnel [40, 41] distinguant dans un premier temps six émotions de base : la tristesse, la joie, la colère, la peur, le dégoût et la surprise. Ils affinent par la suite cette liste pour atteindre 16 émotions de base. Ce travail a permis à Ekman et Freisen d'acquérir une notoriété dans le domaine de la recherche sur les émotions et ce pour l'universalité des émotions de base identifiées et la mise au point d'un système de décodage de faciales « *Facial Action Coding System (FACS)* » pour permettre l'identification de l'émotion exprimée par un individu.

La seconde catégorie, appelée par Scherer [115] « la théorie des palettes émotionnelles (*palette theory of emotions*) », assimile en revanche l'émotion à l'ensemble des couleurs de base, à partir desquelles dérivent les émotions secondaires. En 1980 Robert Plutchik [95] propose un modèle structurel d'émotion basé sur la théorie des palettes émotionnelles où il identifie huit émotions primaires : la peur, la surprise, la tristesse, le dégoût, la colère, l'anticipation, la joie et l'acceptation, et utilise la notion d'associations émotionnelles pour illustrer le concept d'émotion composées. Plutchik rapproche sa conception de l'émotion à une représentation d'un espace tridimensionnel d'une palette de couleur (figure 5.11), où les émotions sont organisées de façon polaire. Pour expliquer cette organisation bipolaire, Plutchik fait référence à la tendance comportementale associée à chaque émotion. Les deux émotions « la colère » et « la peur » par exemple sont bipolaires dans la mesure où la colère provoque un comportement d'attaque et d'agression alors que la peur induit plutôt un comportement de rétraction. Par conséquent ces deux émotions se trouvent dans deux côtés opposés dans la palette émotionnelle de la figure 5.11. Le modèle de

5. Modèle de mobilité et modèle émotionnel

Plutchik a été critiqué sur quelques notions, néanmoins certaines idées sont approuvées par d'autres auteurs et se trouvent par conséquent dans d'autres théories.

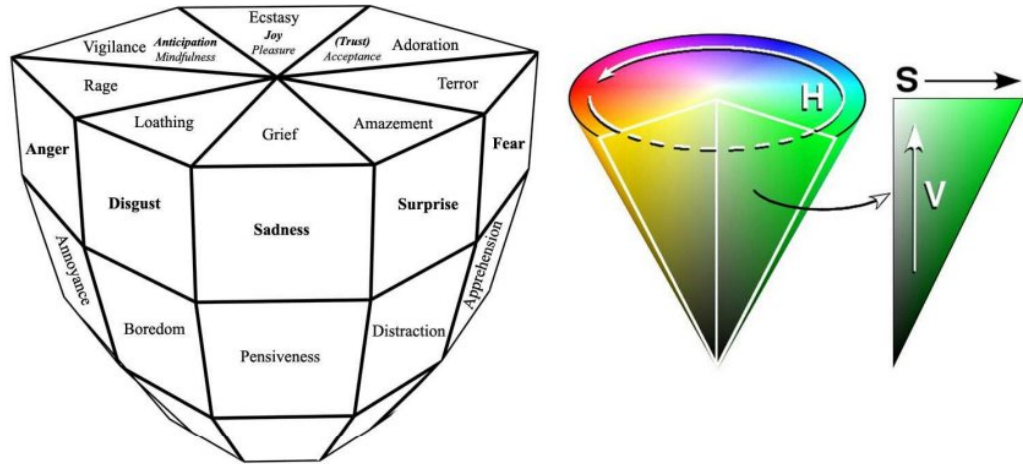


FIGURE 5.11: Modèle d'émotion tridimensionnel de Plutchik [95] comparé à l'espace HSV [136] (*i.e* espace cylindrique de représentation des points dans le modèle de coloration RGB)

Les théories dimensionnelles

Selon Wundt « rien ne serait plus trompeur que de décrire essentiellement l'expression émotionnelle comme la somme invariable de sentiments élémentaires (*nothing would be more misleading than describing emotional experience as the sum of essentially invariable elementary feeling*) » [141]. Wundt propose ainsi une approche dimensionnelle selon laquelle les phénomènes émotionnels peuvent se décrire et s'expliquer en faisant appel à un ensemble de dimensions élémentaires qui se combinent pour produire n'importe quel état émotionnel. Au sein de ce courant dimensionnel, Russel propose en 1980 [110] un modèle circulaire postulant que l'espace affectif peut être représenté par un cercle dans un espace bidimensionnel, avec les dimensions plaisant/déplaisant et activation/désactivation (figure 5.12).

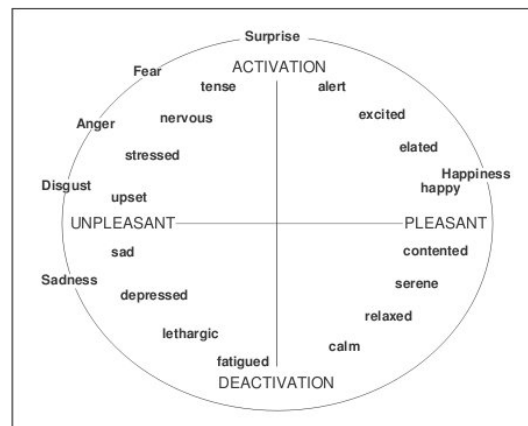


FIGURE 5.12: Espace bidimensionnel de Russel formé par les dimensions plaisant/déplaisant et activation/désactivation [110].

Russel conteste ainsi l'approche de Schlosberg qui fait intervenir une troisième dimension pour une représentation de l'émotion. Toutefois, Russel s'est penché sur l'étude de la nécessité de cette troisième dimension avec Mehrabian, ils examinent pour ce fait la différence entre « la colère » et « l'anxiété » (*i.e* rapproché à l'émotion de peur). Russel & Mehrabian stipulent alors que la différence entre ces deux émotions peut se situer au niveau du critère de dominance. C'est par le biais de l'analyse de régression qu'ils ont pu constater que la colère admet une quantité significativement positive de la dominance alors que l'anxiété d'une quantité significativement négative de la dominance [109], les deux émotions admettent cependant un même niveau de plaisance ainsi que d'activation.

« *These data provide direct support for all aspects of the proposed hypotheses : both anger and anxiety contain high arousal and low pleasure. The distinction between anger and anxiety lies along the dominance dimension : anger involves high dominance, anxiety involves submissiveness.* »

Russel et Mehrabian constatent alors la difficulté de représenter les deux émotions dans un espace réduit à deux dimensions. En effet, la peur et la colère se trouvent relativement proches dans un espace fondé sur les seuls critères d'activation et du plaisir. Ils proposent alors un modèle de représentation tridimensionnel [109] dans lequel les émotions sont classées selon les dimensions bipolaires suivantes : appréciabilité/non-appréciabilité (+P/-P), activation/désactivation (+A/-A) et dominance/soumission (+D/-D)¹ (figure 5.13). Russel et Mehrabian classent dans cet

1. Nous utilisons le terme « *PAD space* » dans le reste du document pour désigner cet espace tridimensionnel.

5. Modèle de mobilité et modèle émotionnel

espace 151 émotions et les présentent dans le *PAD space*, nous pouvons ainsi remarquer la présence des six émotions de base du modèle d'Ekman à savoir la joie, la colère, la surprise, la peur, la tristesse et le dégoût (figure 5.13).

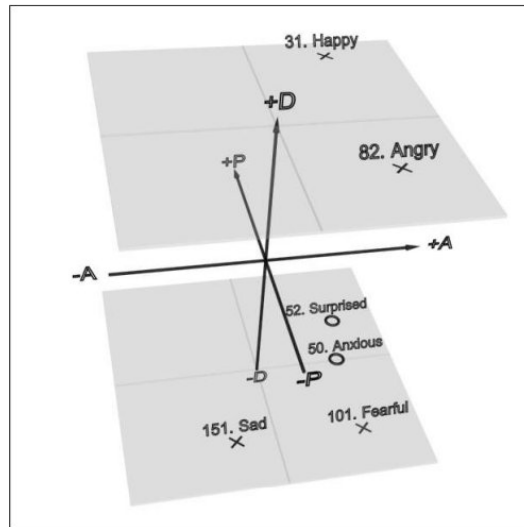


FIGURE 5.13: Espace tridimensionnel de l'émotion (*PAD space*) proposé par Russel et Mehrabian. L'espace est décomposé en trois dimensions à savoir la dimension « plaisance-déplaisance » (+P/-P), « activation-désactivation » (+A/-A) et « dominance-soumission » (+D/-D)[109].

Les modèles de personnalité

Bien que la personnalité joue un rôle important dans la détermination du comportement des personnes, elle n'est pas prise en compte dans la plupart des modèles de mouvements de foule. Ce qui rend justement les comportements des individus plutôt homogènes. Différents travaux en psychologie cognitive se sont ainsi développés pour rendre compte de l'importance de la personnalité dans la caractérisation des comportements individuels et dans la diversification des réactions face aux événements.

Les modèles proposés sont définis sur un ensemble de traits de personnalité où chaque traits est associé à des propriétés spécifiques de comportement. Le modèle de Eysenck par exemple est fondé sur trois traits :

- le neuroticisme ou névrosisme opposé à la stabilité émotionnelle : à l'image de Watson *et al* [130] et Costa *et al* [78] la plupart des auteurs en science cognitive identifient les individus neurotiques comme des individus qui se caractérisent

par une expérience chronique d'émotions négatives, ce qui leurs donne une tendance à interpréter les événements plus négativement et donc ressentir plus intensément les émotions négatives. En revanche, les individus dont le taux de neuroticisme est faible sont identifiés comme des personnes ayant une grande stabilité émotionnelle et ayant une tendance à réagir de façon plutôt calme et réfléchi aux événements.

- l'extraversion opposée à l'introversion : ces deux traits de personnalité font l'objet d'un moindre consensus que le précédent trait. Pour certains auteurs, l'aspect central de l'extraversion est la sociabilité de l'individu [79], alors que pour d'autres auteurs comme Goldberg associent ce critère à la notion de dominance [49] ou à la capacité à ressentir les émotions positives pour Watson et Clark [130, 131]. Néanmoins, sur un des aspects un consensus existe. Ce dernier permet de considérer les individus extravertis plus enthousiastes, plus confiants en eux et ayant tendance à interpréter positivement les événements, ce qui les rend plus sensible face aux émotions positives.
- le psychotisme : les personnes ayant ce trait sont identifiées comme des individus froids, impersonnels, hostiles, non émotifs et peu enclin à aider autrui [135].

Le modèle de OCEAN de McCrae et al [78] distingue cinq traits centraux. Outre le neuroticisme (**N**) et l'extraversion (**E**), le modèle met en évidence l'importance de l'agréabilité (**A**), tendance à être compatissant et coopératif; la conscience (**C**), aptitude à respecter les obligations et l'ouverture à l'expérience (**O**), appréciation de l'art, de l'émotion, de l'aventure et de l'imagination. D'autres modèles proposent d'utiliser d'autres critères de personnalités comme le modèle MBTI de Briggs Myers [84], où on distingue, en plus de l'extraversion, d'autres critères tel que l'intuition, la réceptivité sensorielle et la capacité de jugement.

Malgré leurs différences ces modèles se rejoignent pour mettre en évidence l'influence de certains traits de personnalité sur l'intensité des émotions. En effet, l'extraversion/introversion et le neuroticisme sont identifiés comme des critères permettant de déterminer la sensibilité de l'individu à ressentir les émotions positives ou négatives. L'intégration de la personnalité dans la modélisation des comportements permet d'augmenter le réalisme du mécanisme d'évaluation cognitive en adoptant la réaction émotionnelle en fonction des traits personnels de chaque individu. C'est pour cette raison que nous adoptons dans notre modèle une approche émotionnelle intégrant la personnalité pour l'évaluation de l'intensité des émotions déclenchées.

5.3.3 **Modèle de l'émotion**

Dans une démarche cognitive de modélisation de la mobilité, nous proposons un modèle comportemental fondé sur une approche émotionnelle se référant au modèle des émotions de base d'Ekman et Freisen et leurs représentations dans un espace multidimensionnel. En effet, les émotions de base du modèle d'Ekman qui sont représentées dans l'espace tridimensionnel de Russel et Mehrabian suffisent pour exprimer l'état émotionnel d'un individu suite à un événement positif ou négatif. Nous choisissons de ne pas traiter l'émotion de dégoût dans notre approche car nous la considérons comme peu importante dans l'architecture émotionnelle d'un individu virtuel dans le problème qui nous concerne.

Sur la base de ces deux concepts, nous avons construit un modèle fondé sur des émotions que nous déterminons selon la valeur de leurs trois critères dans l'espace tridimensionnel *PAD space*. Cette construction impose l'intégration d'un processus d'évaluation, car la détermination de l'émotion exige une mesure des critères d'appréciation, d'éveil et de dominance. Nous associons alors à notre modèle émotionnel une approche d'évaluation fondée sur la théorie de l'appraisal. Notre choix s'est porté sur le modèle *Sequential Check Theory of Emotion Differentiation* de Scherer (section 3.3.3) en raison de la similarité entre ses critères d'évaluation et les dimensions de l'espace tridimensionnel de Russel & Mehrabian. Cependant, seuls trois critères d'évaluation sont pris en compte, à savoir : l'adéquation (*relevance*), l'implication (*implication*), le potentiel de gestion de la situation (*coping potential*), et ce pour leurs pertinences à ce stade de modélisation.

Dans ce contexte de similarité entre les dimensions de l'espace *PAD space* et les critères d'évaluation du modèle de Scherer, nous associons :

- La dimension de plaisance au critère d'adéquation (*relevance*) : l'évaluation de l'adéquation est dépendante de l'appréciation (*plaisance*) du stimulus par l'individu ;
- La dimension d'activation au critère d'implication (*implication*) : l'évaluation de l'implication est fonction de trois critères, à savoir les conséquences probables du stimulus (*résultat probable*), l'influence du stimulus sur les buts (*la conductance au but*) et le niveau d'urgence de la nouvelle situation en fonction des buts (*l'urgence*) ;
- La dimension de dominance au critère de potentiel de gestion de la situation (*coping potential*) : l'évaluation du potentiel de gestion de la situation est fonction de la capacité de l'individu à maîtriser la nouvelle situation (*control*).

Représentation de l'émotion

Notre représentation est fondée sur cinq émotions que nous classons dans deux catégories selon la cause de la perturbation. Afin de simplifier la détermination du type de l'émotion déclenchée nous identifions les conséquences du stimulus sur les objectifs. Pour les émotions positives nous considérons les deux émotions *joie* et *surprise*. Nous estimons qu'une perturbation peut déclencher une émotion de joie si elle est désirable et dont les conséquences sont positives ou neutre sur le déroulement des actions de l'individu. En effet, dans notre approche, la perception d'une issue de secours, par exemple, déclenche une émotion de *joie* chez les évacués puisque ce dernier contribue à l'amélioration du flux d'évacuation. En revanche, nous considérons qu'un événement peut déclencher une émotion de *surprise* s'il est inattendu et sans conséquence sur les objectifs de l'individu.

Selon la même logique, les émotions négatives sont identifiées selon le degré d'influence du stimulus sur les objectifs. Nous considérons qu'un événement indésirable sans conséquences sur les buts déclenche une émotion de *tristesse*. En revanche, un événement contrôlable qui n'oblige l'individu qu'à un changement de plan pour atteindre le même objectif (changement de la trajectoire par exemple) provoque une émotion de *colère*. Enfin, nous considérons que l'émotion de *peur* se déclenche en réponse à un événement indésirable et incontrôlable menant à un changement radical au niveau des objectifs de l'individu.

Nous proposons de représenter chaque émotion déclenchée d'un individu i à un instant t suite à une perturbation k par un vecteur d'attribut $e^k(t)$ tel que :

$$e^k(t) = \{relevance^k(t), implication^k(t), contrle^k(t)\} \quad (5.4)$$

avec :

$$implication^k(t) = result_proba^k(t) * conductance^k(t) * urgence^k(t) \quad (5.5)$$

L'attribut *relevance* indique le degré d'appréciation de la perturbation par un individu, l'attribut *résultat probable* définit le taux d'influence négatif du stimulus sur les objectifs, l'attribut *conductance aux buts* renseigne sur la nature de l'influence du stimulus sur les objectifs, l'attribut *urgence* désigne l'urgence d'action suite à la perturbation et l'attribut *contrôle* renseigne sur la capacité de l'individu à s'adapter à la nouvelle situation.

A l'image de l'espace tridimensionnel de Russel & Mehrabian nous proposons un espace tridimensionnel (*RIC space*) (figure 5.15). Chaque attribut du vecteur émotionnel appartient à un intervalle de valeur. Nous définissons l'attribut *relevance* (+R/-R) sur l'intervalle $[-1, 1]$ indiquant l'intensité et l'agrément d'une perturbation. Nous définissons aussi l'attribut *implication* (+I/-I) sur l'intervalle $[-1, 1]$

5. Modèle de mobilité et modèle émotionnel

décrivant le degré d'implication d'une perturbation dans la variation des objectifs de l'individu. Nous proposons d'affecter deux valeurs pour l'attribut *control* (+C/-C), la valeur 1 pour désigner une adaptation à la nouvelle situation et -1 dans le cas contraire. Nous identifions par la suite pour chaque émotion du modèle un intervalle de valeur dans l'espace tridimensionnel (tableau 5.1). L'émotion déclenchée est ainsi déterminée en fonction des valeurs des attributs du vecteur émotionnel et leurs correspondances dans l'espace tridimensionnel.

Nous ajoutons deux émotions aux cinq émotions d'Ekman : l'émotion *neutre* et l'émotion *panique*. Nous supposons que l'émotion *neutre* est un état émotionnel qu'admet un individu en absence de toute perturbation. Nous désignons par la *panique* en revanche un état extrême de la *peur* (nous détaillons cette notion dans le chapitre 6.)

TABLE 5.1: Intervalle des valeurs des émotions dans l'espace *RIC space*.

Émotion	Relavance	Implication	Contrôle
Colère	$[-1, -0.5]$	$[-1, 1]$	1
Peur	$[-1, -0.5]$	$[-1, 1]$	-1
Tristesse	$[-0.5, -0.01]$	$[-1, 1]$	-1,1
Neutre	$[-0.01, 0.01]$	$[-1, 1]$	1,-1
Surprise	$[0.01, 0.5]$	$[-1, 1]$	-1,1
Joie	$[0.5, 1]$	$[-1, 1]$	-1,1
<i>Panique</i>	$[-1, -0.8]$	$[-1, 0.5]$	-1

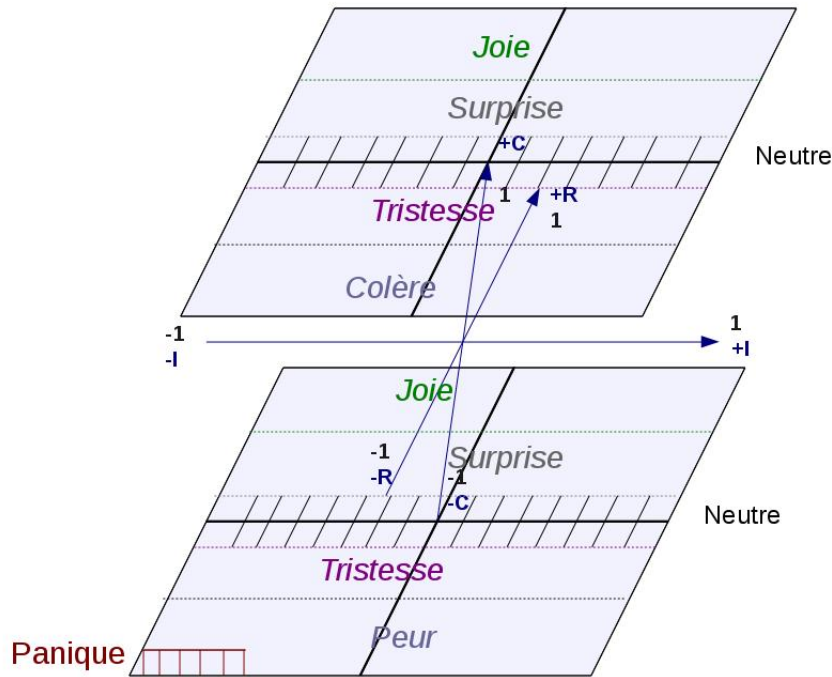


FIGURE 5.14: Espace tridimensionnelle de l'émotion (*RIC space*) basé sur l'approche de Russel et Mehrabian.

Types et intensités des émotions

Nous définissons dans notre modèle tout d'abord chacune des émotions modélisées en termes de pertinence, implication et contrôle, en se référant au modèle de Russel et Mehrabian [109]. Nous associons par la suite une valeur pour chaque attribut du vecteur émotion à un événement (tableau 5.2), afin de déterminer une catégorie et une intensité de l'émotion que devraient déclencher un événement chez un individu ayant une personnalité parfaitement neutre (nous décrivons dans la suite l'influence de la personnalité sur l'intensité de l'émotion). Cette approche de modélisation repose sur une méthode simple, fondée sur les émotions ressenties par les personnes en fonction des variations que subit l'environnement.

5. Modèle de mobilité et modèle émotionnel

TABLE 5.2: Valeurs des dimensions du *RIC space* selon le type du stimulus déclenché.

Stimulus	Relevance	Résultat probable	Conductance aux buts	Urgence	Contrôle
Incendie	-0.34	0.34	-1	1	-1
Bousculade	-0.44	0.39	-1	1	-1
Feux d'artifice	0.34	0.13	1	1	1

Influence de la personnalité sur l'émotion déclenchée

Les travaux sur la personnalité mettent en évidence l'influence de la personnalité dans le processus émotionnel de l'individu. De nombreux traits sont ainsi identifiés, cependant nous nous intéressons seulement à l'impact des traits d'*extraversion* et de *neuroticisme* en raison de leurs grandes importances dans le comportement de chacun des individus en situation de danger. Nous prenons par conséquent en considération les influences suivantes :

- Un individu extraverti ressent plus intensément les émotions positives qu'un individu introverti, mais l'extraversion n'a pas d'influence sur les émotions négatives ;
- Un individu neurotique ressent plus intensément les émotions négatives, mais n'a aucune influence sur les émotions positives.

La personnalité d'un individu dans notre modèle est représentée par un couple $(p(extra), p(neuro)) \in \{-1, 1\}$. L'émotion déclenchée par un événement est déterminée à partir du stimulus tel qu'il a été défini précédemment. Selon la personnalité de l'individu, s'il est extraverti et la nature de l'événement est positif, l'intensité de l'émotion positive déclenchée sera plus forte. Inversement, si l'individu est neurotique et l'événement est de nature négative, l'émotion négative déclenchée sera plus élevée. Nous définissons pour chaque individu selon son facteur de personnalité une fonction $f(p^j, e^k(t))$ qui retourne une valeur dans l'intervalle $[0, 1]$, représentant l'influence du trait j sur l'émotion déclenchée $e^k(t)$. Notons que lorsque le trait de personnalité j n'a pas d'influence sur l'émotion k la valeur de la fonction f est égale à 0.

L'influence de la personnalité j sur l'intensité de l'émotion déclenchée est calculée selon l'équation suivante :

$$e_i^k(t) = \begin{cases} \text{relevance}^k(t) * f(p^j, e^k(t)) \\ \text{implication}^k(t) * f(p^j, e^k(t)) \end{cases} \quad (5.6)$$

Dynamicité de l'émotion

La persistance d'une émotion est liée à la persistance de l'événement déclencheur. Son intensité croît naturellement tant que l'événement perdure et décroît s'il disparaît. En effet, la dynamicité de l'émotion dépend *a priori* de la nature de l'émotion déclenchée. Selon ElNasr [86] par exemple les émotions négatives sont souvent considérées comme plus persistante que les émotions positives et aussi selon la personnalité d'après Luminet [74]. C'est dans cette logique que nous intégrons à notre modèle cette notion d'évolution de l'état émotionnel chez l'individu. Nous associons pour ce fait une fonction de croissance et de décroissance pour chaque composante du vecteur émotionnel, dont le calcul dépend du type de l'émotion déclenchée chez l'individu ainsi que de sa personnalité.

En l'absence d'événement ou dans le cas d'une variation de la nature d'un événement, l'intensité des émotions ressenties décroît. Nous définissons pour cela une fonction de décroissance (équation 5.7) sur les attributs *relevance* et *implication* du vecteur émotion. Une réévaluation de l'attribut *control* est cependant effectuée une fois que l'émotion « neutre » est atteinte.

On note alors, $K = \{Evt_{pos}, Evt_{neg}\}$ où Evt_{pos} désigne l'ensemble des événements pouvant déclencher une variation positive dans l'environnement de l'agent et Evt_{neg} l'ensemble des événements pouvant déclencher une variation négative :

$$\begin{cases} e_i^k(t) = e_i^k(t-1) * \exp -Dp_i, \forall k \in \{Evt_{pos}\} \\ e_i^k(t) = e_i^k(t-1) * \exp -Dn_i, \forall k \in \{Evt_{neg}\} \end{cases} \quad (5.7)$$

avec Dp_i taux de décroissance d'une émotion positive et Dn_i taux de décroissance d'une émotion négative.

Donc si à $(t-1)$ un individu admet une émotion négative, la perception d'un stimulus positif fait décroître cette dernière selon le taux de décroissance Dc_i . Et réciproquement si l'individu affiche à l'instant $(t-1)$ une émotion positive, la perception d'un stimulus négatif fait décroître l'intensité de cette émotion selon le taux de décroissance Dp_i .

Dans cette même logique, nous définissons une fonction de croissance (équation 5.8) qui assure l'évolution de l'émotion en cas de persistance d'un événement ou la

5. Modèle de mobilité et modèle émotionnel

croissance de son intensité.

$$\begin{cases} e_i^k(t) = e_i^k(t-1) * Cp_i, \forall k \in \{Evt_{pos}\}, \\ e_i^k(t) = e_i^k(t-1) * Cn_i, \forall k \in \{Evt_{neg}\} \end{cases} \quad (5.8)$$

avec Cp_i taux de croissance d'une émotion positive et Cn_i taux de croissance d'une émotion négative.

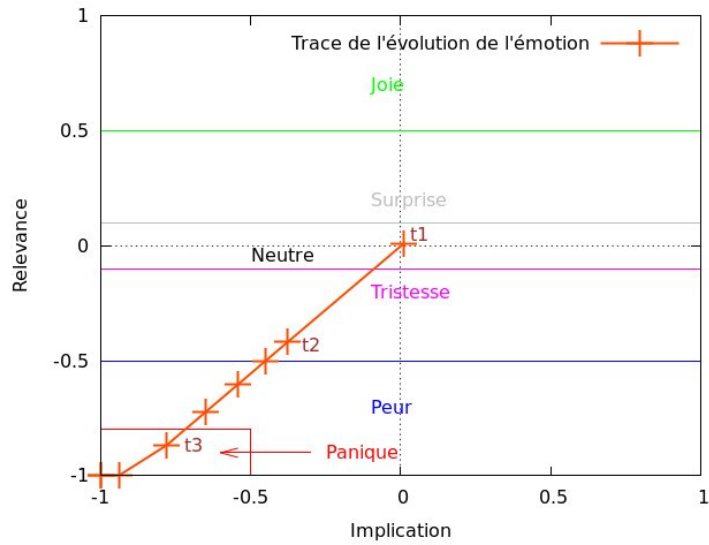


FIGURE 5.15: Trace de l'évolution de l'émotion (neutre) dans le temps en terme d'*Implication* et de *Relevance* (*i.e* la *Dominance* est égale à (-1)), en réponse à un stimulus négatif. À t_1 : perception du stimulus et variation de l'état émotionnel initial, à t_2 : déclenchement de l'émotion de *peur*, à t_3 : persistance du stimulus négatif et augmentation de l'intensité de l'émotion jusqu'à l'émotion de *panique*.

Synthèse du modèle de l'émotion

Selon les études en neuroscience et en psychologie cognitive, l'émotion est partie intégrante du processus de décision, d'où l'importance de son incorporation dans le processus comportemental de l'individu. Afin de mettre en lumière cette influence ainsi que pour répondre à une modélisation réaliste de mouvements de foule hétérogène, nous avons opté pour cette démarche émotionnelle pour la modélisation des comportements des individus. Pour ce fait, notre approche se fonde sur trois

concepts à savoir les émotions de base, la théorie tridimensionnelle et la personnalité.

Les émotions de base constituent en effet une base admise par la quasi-totalité des spécialistes à l'image d'Ekman [40, 41], Frijda [45], Plutchik [95]. Souvent identifiées comme les émotions primaires, elles se caractérisent par des expressions comportementales spécifiques, des manifestations physiologiques et des ressentis spécifiques. Comme nous l'avons précisé, les émotions de bases identifiées varient selon l'approche d'étude des spécialistes, ainsi que le degré de détail pris en compte pour l'identification de l'émotion. Plutchik, par exemple, distingue huit émotions primaires en se fondant sur la théorie des palettes émotionnelles. Ekman en revanche, présente dans sa première classification des émotions six émotions de base les plus communes dans toutes les études sur les émotions : la tristesse, la joie, la colère, la peur, le dégoût et la surprise. Ces émotions de base forment les émotions les plus élémentaires et les plus faciles à identifier chez l'individu. Elles suffisent ainsi à étudier et à modéliser les émotions déclenchées à cause d'une variation de l'environnement. C'est en raison de cette simplicité d'identification et la généralisation de ces émotions dans les différentes approches d'étude des émotions, que nous avons retenu le modèle d'Ekman et cinq des six émotions de base.

Pour déterminer l'état émotionnel d'un individu simulé, nous nous sommes inspirés de l'approche de Russel et Mehrabian qui repose sur un espace tridimensionnel (*PAD space*). Les critères que nous avons utilisés sont la relevance, l'implication et le contrôle, conformément à la théorie de l'appraisal de Scherer. Ces éléments définissent un espace *RIC space* dans lequel on peut projeter chacun des critères afin de déterminer l'une des cinq émotions de base correspondant au stimulus déclenché.

La notion de personnalité est également intégrée au processus d'évaluation des émotions déclenchées. Nous utilisons deux traits de personnalité : l'extraversion et le neuroticisme, où à chaque trait sont associés des propriétés spécifiques comportementales. Cette approche de modélisation nous permet de faire varier l'intensité de l'émotion selon les spécificités de chaque individu, ce qui assure par conséquent une certaine diversité dans les comportements.

La prise en compte de l'impact des traits *extraversion* et *neuroticisme* sur l'intensité des émotions est illustrée dans notre modèle par l'accroissement des attributs du vecteur émotion suivant des taux d'accroissement dépendant du trait et de la nature de l'émotion (équation 5.8).

5.3.4 Mobilité et interaction entre composantes

La mobilité des individus est un processus complexe faisant intervenir deux composantes : réactive et cognitive. Ces deux niveaux d'abstraction sont primordiaux dans le processus comportemental de l'individu, ils assurent en effet l'émergence de comportement de déplacement cohérent et autonome. Nous avons détaillé dans ce qui précède chaque niveau séparément, nous procédons dans ce qui suit à la description de leurs principes de fonctionnement dans le modèle de mobilité des agents, ainsi que de leurs interactions avec le modèle de l'environnement (figure 5.16).

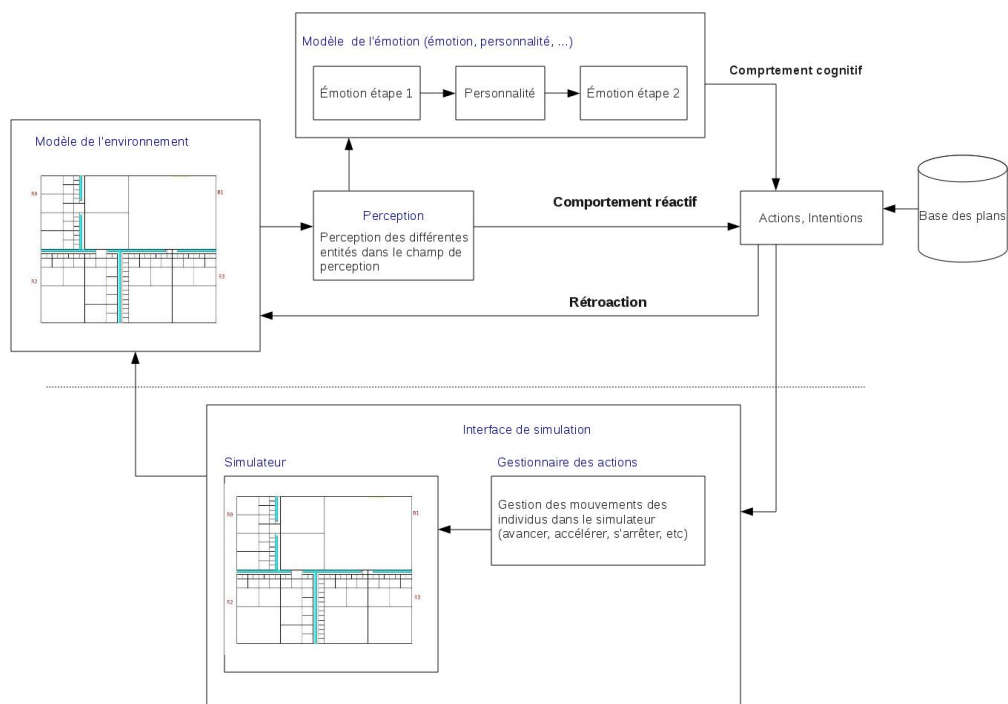


FIGURE 5.16: Le modèle de mobilité.

Avant toute action, chaque individu I de notre modèle active son processus de perception, ce qui lui permet d'interroger son environnement afin d'obtenir les informations nécessaires à la réalisation d'une description subjective de son monde. Une fois les données de l'environnement obtenues, l'individu vérifie :

- la présence d'obstacle l'obligeant à modifier sa trajectoire de déplacement tel qu'un individu ou autres objets fixe de l'environnement ;

- la disparition ou la persistance d’un stimulus ou bien le déclenchement d’un événement susceptible de provoquer un changement important dans les objectifs d’un individu tel qu’un incident nécessitant la fuite ou une ouverture d’un nouvel issu de secours facilitant l’évacuation.

En l’absence de toute perturbation et dans le cas où l’individu admet un état émotionnel *neutre*, les comportements de ce dernier sont purement réactifs. Seules donc les règles de déplacement seront nécessaires pour gérer la mobilité dans l’espace. Le raisonnement de l’agent du modèle se limite désormais à l’activation des routines réactives en réponse aux informations perçues. En revanche, la présence d’un état émotionnel autre que neutre peut déclencher un comportement cognitif chez l’individu. En effet, en cas de disparition de la perturbation, l’intensité d’une émotion décroît [74] et tend vers un état *neutre*. Le module émotionnel calcule donc la nouvelle émotion de l’agent à l’instant $(t + 1)$ selon une fonction de décroissance qui dépend de sa personnalité (section 5.3.3).

La perception d’un événement affectant la structure de l’environnement, déclenche le processus cognitif chez l’agent. Le module émotionnel s’exécute et identifie la nouvelle émotion ainsi que son intensité. Selon le type et la nature de la perturbation, une nouvelle classification des buts peut être établie, provoquant ainsi une variation des priorités au niveau des objectifs de l’agent. Le cas de déclenchement d’un signal d’alarme dans un immeuble par exemple provoque un changement des priorités, l’agent peut alors changer d’objectif de *travailler* à *évacuer*, par exemple. Le module émotionnel interroge par la suite la base des plans afin de déterminer les différentes actions que doit exécuter l’agent pour atteindre son objectif. Les actions sont alors exécutées l’une après l’autre tout en respectant les règles de déplacement du modèle, et ce en utilisant les routines du comportement réactif en cas de présence d’objet gênant la mobilité de l’agent.

Le modèle de panique : amorce et propagation de la panique dans une foule en mouvement

6.1	Introduction	129
6.2	Le modèle de panique	130
6.2.1	Modélisation de l'émotion de <i>panique</i>	130
6.2.2	Modélisation de la propagation de la panique dans une foule	131
6.2.3	Synthèse	136
6.3	Intégration de la panique dans le modèle mobilité	136

6.1 Introduction

Souvent identifiée par ses conséquences, la panique est définie comme une réaction non prévisible, un phénomène spontané et non contrôlable qui peut faire basculer une foule dans un désordre total. D'une manière générale, tout rassemblement d'individus porte en lui les germes de la panique. Si un danger ou une menace se manifeste, la peur peut s'emparer des esprits et se propager de proche en proche dans toute la foule comme une avalanche. Néanmoins, cette même population est aussi capable de maîtriser ce mal et refouler tout signe de dérapage de ses membres. Comprendre et modéliser la panique et son processus de propagation est ainsi primordial pour pouvoir assurer la sécurité des personnes et réduire les impacts éventuel de l'incident ou de la catastrophe. Ainsi que nous l'avons déjà mentionné, c'est dans ce cadre de prévention et de protection de la population que se situe ce travail. Pour atteindre cet objectif, notre démarche est celle de la mise au point d'une méthode permettant de décrire le processus d'apparition de la panique chez l'individu ainsi que son mécanisme de propagation dans une foule.

6. Le modèle de panique : amorce et propagation de la panique dans une foule en mouvement

Dans la première section de ce chapitre, nous présentons notre approche de modélisation de la panique. Nous présentons dans la deuxième section le modèle de mobilité (détaillé dans le chapitre 5) en intégrant la couche *panique* et nous décrivons le principe de communication entre ces différentes couches.

6.2 Le modèle de panique

Selon les termes de L. Crocq, la panique est « une peur intense déclenchée par la survenue d'un danger réel ou imaginaire ». Comme la peur donc, la panique est une émotion d'anticipation qui informe l'organisme d'un danger potentiel. Cependant, elle se caractérise par son incidence sur le raisonnement de l'individu. Elle provoque en effet un détachement de la réalité où, au lieu de faire face au danger, l'individu s'imagine des événements et des scénarios catastrophiques éventuellement sans fondement. Ce qui le distrait de la situation devant laquelle il doit faire face pour assurer sa sécurité.

En s'appuyant sur cette définition, nous avons mis en place une approche fondée sur les émotions pour modéliser le processus de déclenchement de la panique chez l'individu. Nous nous sommes inspirés par la suite des études de l'école Française et de l'école Américaine (chapitre 3) pour mettre en place un modèle de propagation de la panique dans une foule.

6.2.1 Modélisation de l'émotion de *panique*

Lorsqu'une perturbation persiste, le danger demeure présent et la peur des personnes croît progressivement. Cette peur croissante peut basculer chez certaines personnes, plus sensibles à la panique, vers une émotion de panique qui les envahit et les rend sujet à tout débordement. Notre approche de modélisation de la panique se fonde sur ce concept dynamique de l'évolution de l'émotion. Dans notre espace tridimensionnel (*RIC space*) nous avons défini une région de panique incluse dans la région affectée à l'émotion de peur. Ainsi, l'atteinte de cette zone seuil fait alors basculer l'individu vers un état de panique dont l'intensité augmente en présence du danger et décroît s'il disparaît.

Tel que décrit dans la littérature, la panique place l'individu dans un état d'affolement complet qui déclenche des comportements incohérents et imprévisibles. Néanmoins, les comportements des paniqués varient selon les caractéristiques de chaque personne : quand certains se lancent dans des courses effrénées et désordonnées, d'autres vont rester indifférents ou dans un état de calme « apparent ». Cette hétérogénéité des comportements nous l'avons modélisé en dotant les individus de différents critères psychologiques tels que l'impatience et des critères physiques tels que l'augmentation de la vitesse de déplacement ou la réduction de la distance de

confort par rapport aux autres entités de l'environnement.

6.2.2 Modélisation de la propagation de la panique dans une foule

Comme nous l'avons développé dans le chapitre 3.2, la panique s'identifie par ses conséquences. Une fuite peut par exemple être considérée comme « une fuite panique » si elle est infondée ou ne présente pas *une solution* pour échapper à l'éventuel danger. En effet, la régression psychologique que connaît un individu paniqué le rend influençable, prêt à « suivre » sans le moindre esprit critique. Le seul mot d'ordre devient *l'imitation* du comportement des voisins. Un mouvement d'imitation généralisé se déclenche, chaque individu copie son voisin espérant que ce dernier connaît les raisons de cette fuite ou bien encore qu'il se dirige vers une sortie permettant d'échapper au danger. Selon Damienne Provitolo la panique est un effet de dominos, soit « le fait d'un aléa entraînant par effet en chaîne l'événement catastrophique » [98]. Sa propagation est donc inévitable surtout dans une population à forte interaction sociale.

La propagation de la panique est ainsi fondée sur un comportement d'imitation favorisé par la structure de la foule. Suivant les termes de Karl Jaspers, la panique est une forme « d'épidémie psychologique », les mécanismes de mimétisme dans la foule s'apparentent alors à des phénomènes de contagion. La panique devient alors la maladie et les individus le vecteur de transmission. Ce rapprochement nous a conduit à concevoir un modèle de propagation de la panique inspiré des modèles épidémiologiques (chapitre 4.4), qui conviennent parfaitement à notre problématique où on s'intéresse à l'étude de l'évolution d'un phénomène. Conforter par le modèle de la panique de Damienne Provitolo [96], qui est inspiré du modèle comportemental SIR proposé par W. Kermack et A. McKendrick. Nous proposons un modèle de propagation de la panique fondé sur l'approche SIR.

Notre modèle est constitué de trois compartiments où les individus sont classés selon leurs états émotionnels (figure 6.1) :

- PSP : compartiment des personnes susceptibles de paniquer : Les individus de ce compartiment expriment une émotion de peur, de tristesse ou de colère.
- NPP : compartiment contenant les personnes non paniquées « calme ». les individus de ce compartiment sont soit non affectés par la perturbation, ils affichent alors une émotion neutre, soit ils estiment que le stimulus provoque des conséquences positives sur leurs objectifs, ils expriment donc une émotion de surprise ou de joie.
- PP : compartiment des personnes en état de panique. Les individus de ce compartiment ont atteint l'état de panique.

6. Le modèle de panique : amorce et propagation de la panique dans une foule en mouvement

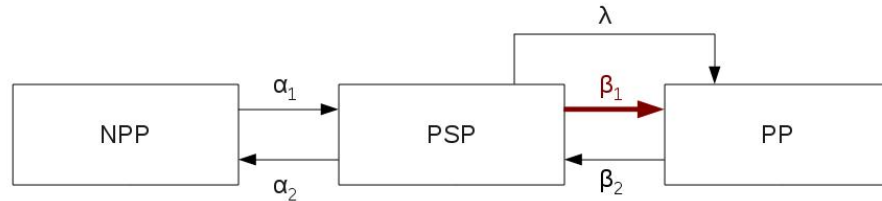


FIGURE 6.1: Modèle compartimental de propagation de la panique.

Le cycle de propagation de la panique peut être plus ou moins rapide selon les caractéristiques de la foule et la dangerosité du stimulus, mais nous estimons que ce cycle implique dans tous les cas deux étapes indispensables. La première est « l'infection » au cours de laquelle la panique est atteinte par évolution temporelle de l'intensité de l'émotion négative (section 5.3.3) chez des individus admettant une prédisposition personnelle à paniquer. La deuxième est la propagation issue des mécanismes de mimétisme qui s'apparentent à des phénomènes de contagion. Les individus du compartiment des susceptibles (PSP) paniquent alors par interaction avec des individus paniqués (PP) de leurs voisinages. L'étude de ces deux étapes est nécessaire pour comprendre la dynamique d'évolution de la panique dans une foule.

Phase « d'infection »

La phase « d'infection » représente le caractère dynamique de l'émotion. Elle est modélisée par des flux de transition entre les trois compartiments du modèle. Les hypothèses sur cette phase sont les suivantes :

- La détermination de la dangerosité du stimulus est fonction de l'évaluation subjective de chaque individu (section 5.3). En effet, les individus qui admettent des prédispositions personnelles à paniquer paniquent, alors que les autres restent dans un état de peur sans jamais atteindre l'état de panique à l'issue de cette phase.
- La transition entre les compartiments du modèle est fonction de l'état émotionnel de l'individu.
- La panique admet une durée de vie limitée, ce qui se traduit par une décroissance de l'intensité de l'émotion de panique au delà d'un certain seuil.

Les flux de transition sont les suivants :

- α_1 : taux de transition d'un individu non paniqué au compartiment PSP : La perception d'un danger fait décroître l'intensité de l'émotion positive chez un individu non paniqué (calme) suivant un taux de décroissance Dp_i et le fait basculer vers un état émotionnel négatif. Le déclenchement de cette émotion négative provoque la transition de l'individu du compartiment NPP au compartiment PSP selon une probabilité α_1 .
- λ : taux de transition d'un individu susceptible de paniquer (*i.e* admettant des prédispositions personnelles à paniquer) au compartiment PP. La persistance du danger fait croître l'intensité de l'émotion négative de l'individu susceptibles de paniquer selon un taux de croissance Cn_i jusqu'à ce qu'il atteigne l'état de panique. Cette variation de l'état émotionnel de l'individu se traduit par la transition vers le compartiment des individus paniqués selon une probabilité de transition λ .
- β_2 : taux de transition d'un individu paniqué au compartiment PSP. Partant du postulat que la panique est une émotion éphémère, l'intensité de l'émotion de panique décroît quand un seuil de panique est atteint. Cette décroissance émotionnelle suivant le taux Dp_i provoque la transition de l'individu concerné vers le compartiment PSP suivant une probabilité β_2 .
- α_2 : taux de transition d'un individu susceptible de paniquer au compartiment NPP. La disparition du danger ou la perception d'un stimulus positif fait décroître l'intensité de l'émotion négative d'un individu susceptible de paniquer suivant le taux Dn_i et déclenche une émotion positive. Cette variation émotionnelle provoque la transition de l'individu du compartiment PSP au compartiment NPP selon la probabilité de transition α_2 .

Ces différents flux que nous considérons sont représentés dans la figure 6.1. Les taux de croissance et de décroissance de l'émotion positive et de l'émotion négative correspondent aux taux détaillés dans la section (5.3.3). La figure 6.2 permet de les visualiser dans notre espace tridimensionnel de l'émotion (RIC space).

6. Le modèle de panique : amorce et propagation de la panique dans une foule en mouvement

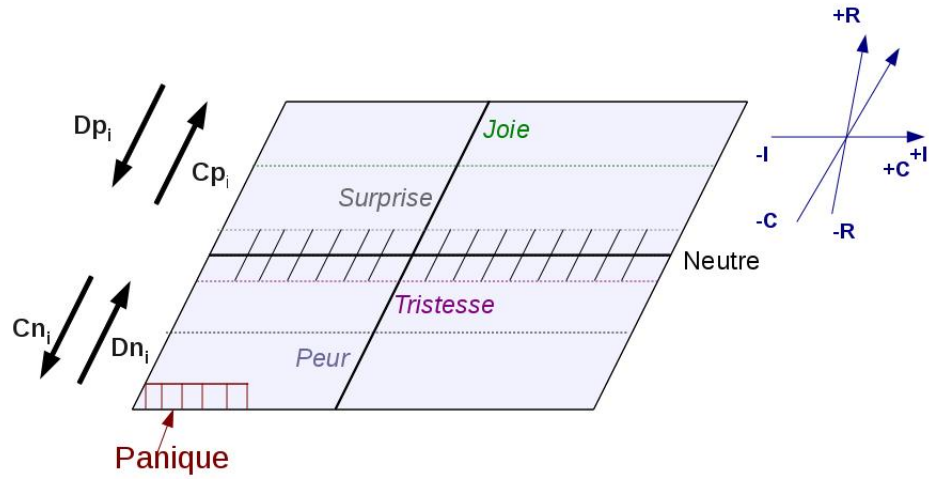


FIGURE 6.2: Dynamicité des émotions positives selon le taux de croissance Cp_i et le taux de décroissance Dp_i et des émotions négatives selon le taux de croissance Cn_i et le taux de décroissances Dn_i .

Phase de contagion

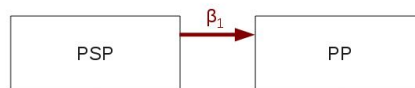


FIGURE 6.3: La propagation de la panique par contact entre les individus susceptibles de paniqués (PSP) et les individus paniqués (PP).

  l'image d'une  pidemie, la panique se transmet par contact entre un individu paniqué et un individu susceptible de paniquer. Nous modélisons cette contagion par un flux d'individus allant du compartiment des susceptibles au compartiment des paniqués selon un taux de transition β_1 (figure 6.3). β_1 définit en effet le taux de contact infectieux, c'est à dire la probabilité de paniquer d'un individu suscep-

tible de paniquer au contact d'un individu paniqué. C'est le paramètre-clé de notre modèle de propagation de la panique. Il permet en effet de changer de phase dans le processus de propagation de la panique entre une phase active où la panique se propage et une phase inactive où elle disparaît.

Dans notre approche, le paramètre β_1 dépend des propriétés intrinsèques de la population ainsi que de la nature du stimulus déclenché. Il existe de nombreuses expressions du paramètre β_1 , nous en avons retenu une communément utilisée proposée de Keeling et Rohani [65] qui rend bien compte de l'influence conjointe de l'individu et de la perturbation (équation 6.1). Où c définit le taux de contact entre individus (propriété intrinsèque de la population) (équation 6.4) et p définit la probabilité d'infection au cours d'un contact infectieux (propriété intrinsèque du stimulus).

$$\beta_1 = -c \log(1 - p) \quad (6.1)$$

Or la probabilité de paniquer $\beta_1 \in [0, 1]$, ce qui nous permet de déduire l'intervalle de valeur de la probabilité d'infection p .

$$0 \leq p < 1 - e^{(-\frac{1}{c})}$$

La population que nous modélisons est fortement hétérogène, le nombre de contacts n'est cependant pas le même entre les individus. Nous calculons par conséquent un taux de contact moyen en nous inspirant des études portant sur les réseaux complexes de Vespigniani *et al* [10]. Nous rapprochons alors une foule à un graphe non orienté $G = (V, E)$ où les nœuds V du graphe correspondent aux individus simulés et les liens E entre les différents points du graphe aux individus qui sont en contact les uns avec les autres en fonction du voisinage. Nous supposons qu'un lien s'établit entre deux individus dès lors que l'un de ces derniers se trouve dans le champ de vision de l'autre, ils forment ainsi le couple $(i, j) \in E$.

Pour tout $i \in V$, soit le degré k_i de i le nombre de sommets j tels que $(i, j) \in E$, c'est à dire le nombre de voisins de l'individu i dans la foule. Nous calculons par la suite la distribution $P(k)$:

$$P(k) = N_k/N \quad (6.2)$$

où N_k est le nombre de sommet de degré k , c'est à dire le nombre d'individu ayant k voisins et N le nombre d'individus dans la foule. La valeur moyenne de contact

6. *Le modèle de panique : amorce et propagation de la panique dans une foule en mouvement*

par individu est donnée par :

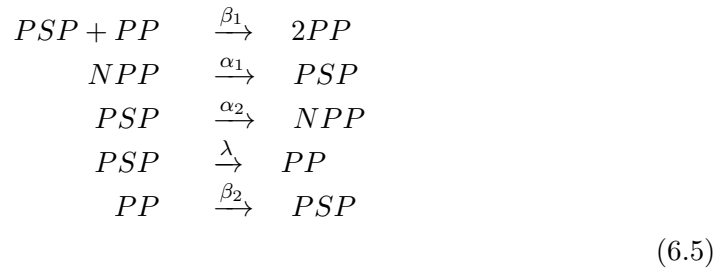
$$\langle k \rangle = \sum_k kP(k) \quad (6.3)$$

le taux de contact c est donc égal à

$$c = \langle k \rangle / N \quad (6.4)$$

6.2.3 Synthèse

Dans notre modèle, la transmission de la panique dans la foule dépend de l'évolution de l'émotion et de la topologie du réseaux de contact le long duquel la panique se diffuse du fait des phénomènes de mimétisme. Le modèle compartimental que nous présentons (figure 6.1) peut être écrit comme une réaction chimique (équation 6.5) où la première réaction indique qu'un individu susceptible de paniquer en contact avec un individu paniqué peut devenir paniqué avec un taux β_1 . C'est à dire avec une probabilité $\beta_1 * \Delta t$ à chaque intervalle de temps $\Delta t \ll 1$. Le reste des réactions du système indiquent cependant le passage de l'individu d'un état à un autre selon un taux de transition (α_1 ou α_2 ou λ ou β_2), qui dépend par ailleurs de la croissance ou de la décroissance de l'intensité de l'émotion de l'individu.



Le réseau de contact de la foule et le taux d'infection β_1 jouent donc un rôle important dans la transmission de la panique. Ils permettent de décrire l'évolution du flux de propagation de la panique en deux phases : une phase active où la panique se propage et une phase d'extinction où la panique disparaît. Nous nous intéresserons dans le chapitre 7 à l'étude de ces deux phases en procédant à l'étude de la valeur critique de transmission de la panique et des conséquences de la topologie du réseau de contact entre les individus sur le processus de propagation.

6.3 Intégration de la panique dans le modèle mobilité

Les catastrophes naturelles, technologiques ou accidentelles provoquent le déclenchement d'une « peur panique » qui s'empare des individus dans tout rassemblement de masse. Cette « peur ensemble » selon l'expression de Louis Crocq [29]

6.3. Intégration de la panique dans le modèle mobilité

se propage de proche en proche pour atteindre un état de panique collectif. La structure de la foule favorise en effet cette propagation. La croissance des interactions inter-individus due à la mobilité augmente le risque de « contamination ». Le désordre social évolue par conséquent comme une avalanche et multiplie le nombre de victimes, de tués et de blessés, rendant la catastrophe de plus en plus meurtrière.

La panique n'est donc rien d'autre qu'une structure contenue dans la foule et qui s'active lorsqu'un danger ou une menace se manifeste. C'est selon cette logique de structure déjà présente dans la foule que nous proposons de modéliser les phénomènes de panique et leurs conséquences sur les flux de mobilité. Le modèle de propagation de la panique est donc un module interne de notre modèle de mobilité. Il se déclenche justement lorsque l'émotion de panique apparaît (figure 6.4). L'activation de ce module induit une variation des comportements, les individus modélisés deviennent par conséquent « non-rationnels » avec une tendance à des attitudes *asociales*. Ce désordre comportementale se traduit dans notre modèle de mobilité par la désactivation de la *Base des plans* de l'agent provoquant non seulement une absence totale de coordination des actions au niveau de l'agent, mais aussi une disparition des comportements de coopération.

Bien que l'image générale de la panique soit celle de la fuite, de la disparition des comportements sociaux (*e.g* violence, individualisme, etc.), nous examinons dans le chapitre suivant (chapitre 7) d'autres conséquences de la panique sur le comportement des individus tel que la formation de groupe. Nous étudions aussi l'impact de ces comportements sur la mobilité en général.

6. Le modèle de panique : amorce et propagation de la panique dans une foule en mouvement

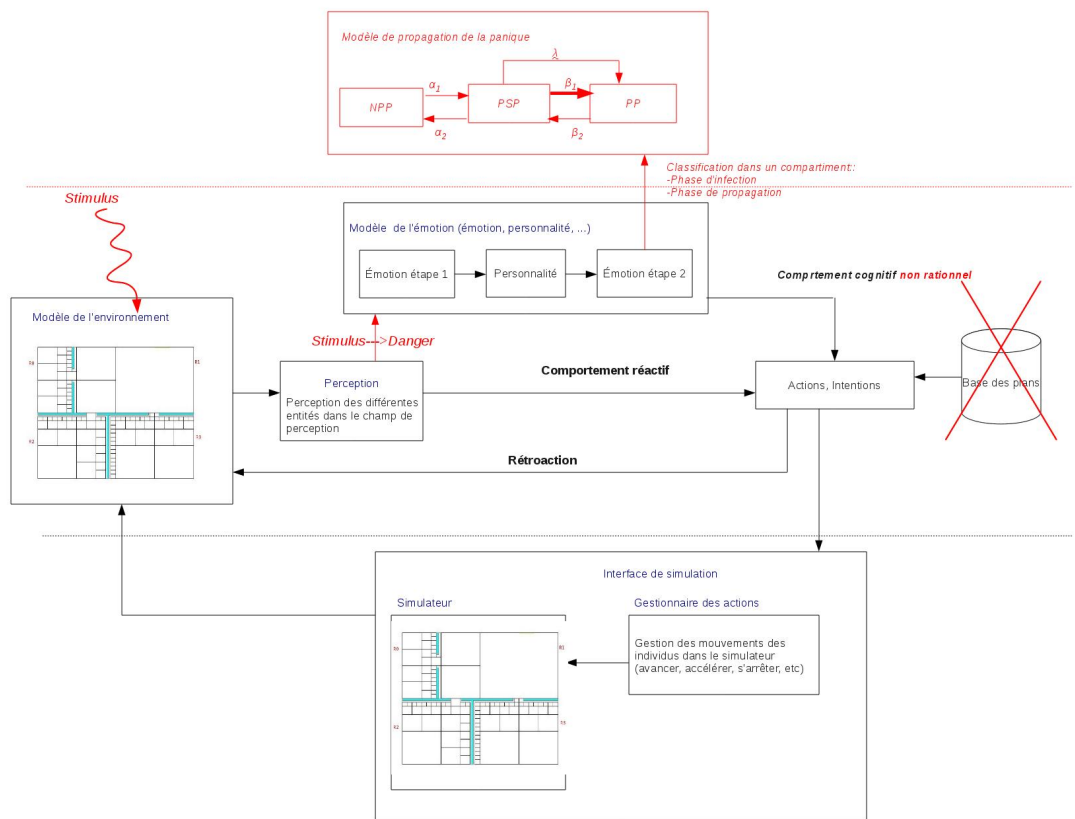


FIGURE 6.4: Modèle de mobilité et de propagation de la panique.

Le travail présenté dans cette partie correspond à l'implantation de notre modèle de propagation de la panique dans une foule. Deux approches de modélisation ont été étudiées. La première approche de modélisation est l'approche microscopique représentée par le modèle de mobilité et de propagation de la panique développé précédemment (chapitre 5 et chapitre 6). Cette approche porte en effet sur un niveau d'organisation particulier, les individus, où la simulation d'un ensemble de ces derniers conduit à l'émergence de structures globales. Plusieurs tests ont été alors menés et ont permis de mettre en évidence l'influence des propriétés cognitives de l'individu et de la mobilité sur l'évolution du flux de propagation de la panique dans la foule.

La seconde partie correspond à une approche de modélisation macroscopique. Cet aspect nous a permis de décrire l'évolution du paramètre d'état « panique » par rapport au temps. Cette démarche agrégative agrège l'ensemble des individus formant la foule, dont les caractéristiques sont le résultat émergent de la dynamique globale. C'est une approche qui nous assure une description de l'évolution d'une population avec ses caractéristiques particulières et non l'évolution des individus eux-mêmes (*i.e* caractéristique de l'approche individu-centrée).

Le développement de ces deux niveaux d'abstraction permet de renforcer la complémentarité entre les modèles comportementaux microscopiques et les modèles dynamiques macroscopiques dans le traitement des phénomènes concrets à différents niveaux d'échelles et de description.

Expérimentations et étude des résultats

7.1	Introduction	141
7.2	Implantation du modèle	142
7.3	La phase d'infection	144
7.4	Phase de contagion : propagation de la panique sans la mobilité	146
7.4.1	Effet du réseau social sur la diffusion de la panique . . .	147
7.4.2	Effet de la dynamique de l'émotion sur la diffusion de la panique	154
7.4.3	Effet de la virulence du stimulus sur la diffusion de la panique	158
7.4.4	Effet de la distribution des individus sur la diffusion de la panique	159
7.5	La phase de contagion : propagation de la panique avec la mobilité	164
7.5.1	Effet de la mobilité sur le processus de propagation de la panique	164
7.5.2	Effet de la propagation de la panique sur la mobilité . .	167
7.6	Synthèse du chapitre	172

7.1 Introduction

Le modèle de mobilité que nous avons développé permet de simuler le déplacement d'un grand nombre d'individus en interaction. Nous visons à étudier l'évolution du flux de propagation de la panique dans la foule selon la nature et l'intensité du stimulus. Afin de tester certaines caractéristiques du modèle, nous avons appliqué divers scénarios sur des populations ayant différentes propriétés. Dans la première section de ce chapitre, nous entamons l'étude de la propagation de la panique sur une foule statique, puis nous introduisons dans la deuxième section la mobilité. Cette stratégie d'étude nous permet d'examiner l'influence de la mobilité sur la propagation de la panique, ce qui est un élément important pour l'étude des stratégies qui peuvent être mises en place afin de minimiser le risque de propagation de la panique lors d'une catastrophe.

7.2 Implantation du modèle

Le programme a été conçu en langage Java, en utilisant la plateforme de simulation multi-agent *Repast 3* [104]. Le modèle évolue de façon discrète en temps. Un individu est modélisé par un agent décrit par l'ensemble des attributs $X(A_i) = \{Pos_{(x,y)}(t); \theta_{(x,y)}(t); V_{(x,y)}(t); \phi_{(x,y)}(t); \delta_{(x,y)}(t); D_i; D_k\}$ avec :

- $Pos_{(x,y)}(t)$ les coordonnées x et y à l'instant t ;
- $\theta_{(x,y)}(t)$ l'orientation à l'instant t ;
- $V_{(x,y)}(t)$ la vitesse à l'instant t ;
- $\phi_{(x,y)}(t)$ le champ de vision à l'instant t ;
- $\delta_{(x,y)}(t)$ le champ d'action à l'instant t ;
- D_i la distance de confort par rapport aux autres agents;
- D_k la distance de confort par rapport aux objets fixes de l'environnement.

Nous représentons un individu par un cercle dont le rayon D_i (figure 7.1) représente la valeur du diamètre bi-huméral humain (*i.e* largeur moyenne d'épaule) et la distance personnelle lointaine selon la spécification de Edward T.Hall [53]. Nous fixons la valeur du diamètre bi-huméral à $0.5m$ et la valeur de la distance personnelle lointaine à $1m$, d'où une valeur de $D_i = 1.25m$.

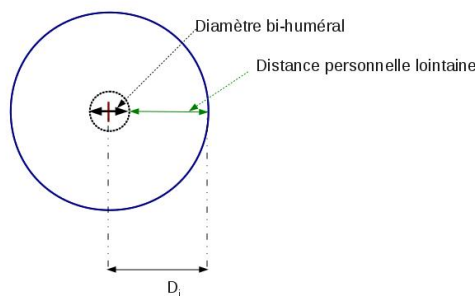


FIGURE 7.1: Représentation de l'individu dans le modèle.

L'écran principal affiche deux vues : (i) une vue qui représente l'environnement virtuel de $87m$ de longueur et de $85m$ de largeur, composé d'obstacles fixes et d'un ensemble d'individus avec une vitesse de déplacement V_i ; (ii) une vue qui représente le graphe d'adjacence issu de la décomposition en région de l'environnement. Le programme permet par ailleurs de changer l'état de l'environnement en cours de simulation et ce en modifiant le stimulus dans la liste des stimulus prédéfinis dans le système.

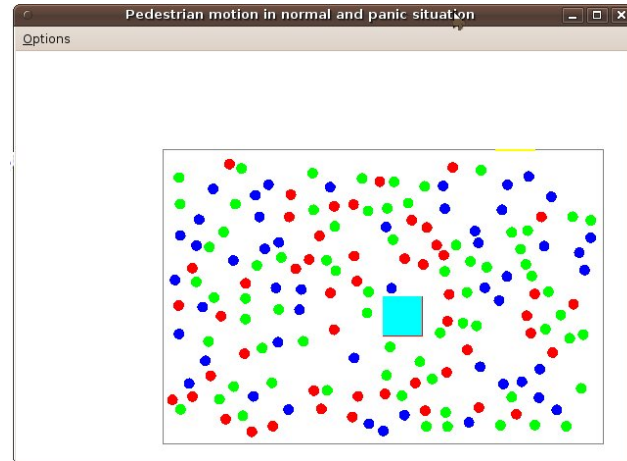


FIGURE 7.2: Capture écran de la vue représentant l'environnement virtuel composé de 50 individus NPP (bleu), de 50 individus PSP (vert) et de 70 individus PP (rouge) et d'un seul objet statique au centre.

7. Expérimentations et étude des résultats

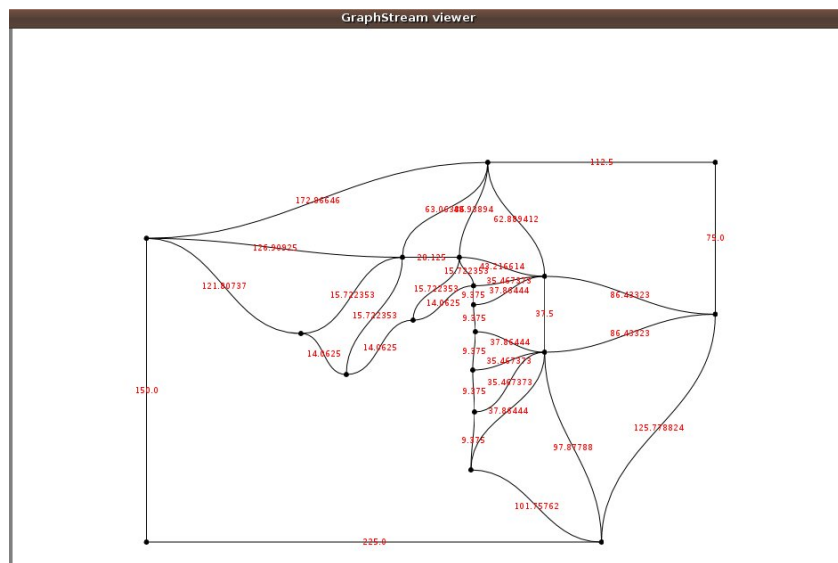


FIGURE 7.3: Capture écran de la vue du graphe d’adjacence issu de la décomposition en régions de l’environnement virtuel de la figure 7.2 en terme de nœuds et d’arcs. Les nœuds du graphe représentent le centre des régions et les arcs représentent les régions adjacentes. Le coût au niveau des arcs indique la valeur de la distance entre les régions voisines.

7.3 La phase d’infection

Le cycle de propagation de la panique admet deux phases (section 6.2.2) : une phase d’infection où seul les individus « prédisposés » à paniquer transitent vers le compartiment PP ; une phase de contagion où la panique se propage dans la foule par mimétisme suite aux interactions sociales entre les individus susceptibles de paniquer et les individus paniqués. Nous nous concentrons dans ce travail sur cette deuxième phase du cycle de vie de la panique, car elle permet de renseigner sur la dynamique de la diffusion de la panique dans des lieux où les interactions sociales sont importantes. Néanmoins, nous présentons un scénario pour illustrer la phase d’infection et pour montrer l’évolution de la population jusqu’à l’apparition des trois compartiments NPP, PSP et PP.

Nous partons d’une population initiale composée d’individus non paniqués (figure 7.4). La perception du stimulus (*i.e* incendie dans cet exemple) déclenche le processus émotionnel chez l’individu et fait décroître l’intensité de son émotion positive. La courbe 7.6 montre que, dans un premier temps, la taille de la population NPP décroît progressivement, ce qui permet l’apparition de la population PSP. Dans

un deuxième temps la population PSP décroît à son tour et fait apparaître les individus paniqués. Cette évolution traduit la dynamique émotionnelle des individus selon notre approche cognitive de modélisation de l'individu. En effet, notre modèle tient compte des caractéristiques personnelles des individus dans le processus d'évaluation du danger, ce qui permet de renforcer la diversité des comportements et donc l'hétérogénéité de la foule. Nous avons choisi d'insister sur la diversification des propriétés personnelles des individus et par conséquent sur leurs émotions afin de se rapprocher de la réalité où chaque individu est différent des autres.

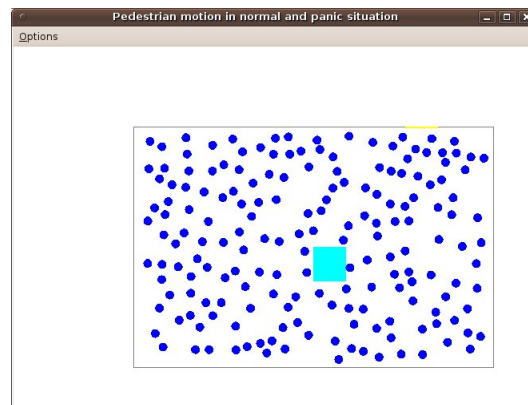


FIGURE 7.4: Capture écran de la vue représentant l'environnement virtuel composé de 180 individus NPP et d'un objet statique au centre. Les individus du compartiment NPP sont répartis aléatoirement dans trois groupes selon leurs états émotionnels initiaux : un premier groupe composé de 61 individus avec une émotion *neutre*, un deuxième groupe composé de 57 individus avec une émotion de *surprise* et un troisième groupe composé de 62 individus avec une émotion de *joie*.

7. Expérimentations et étude des résultats

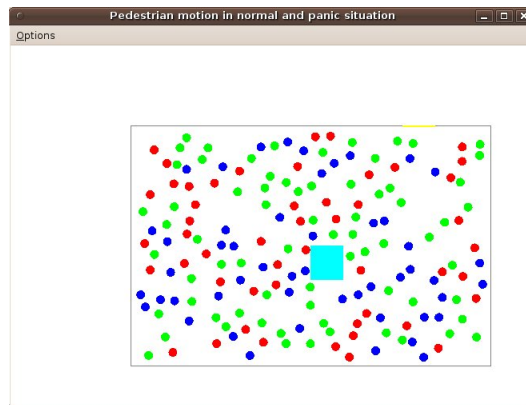


FIGURE 7.5: Capture écran représentant l'évolution de la population initiale après le déclenchement du stimulus « incendie ». Nous observons une répartition des individus dans les compartiments NPP, PSP et PP en réponse à l'évolution de l'état émotionnel des individus causé par le danger.

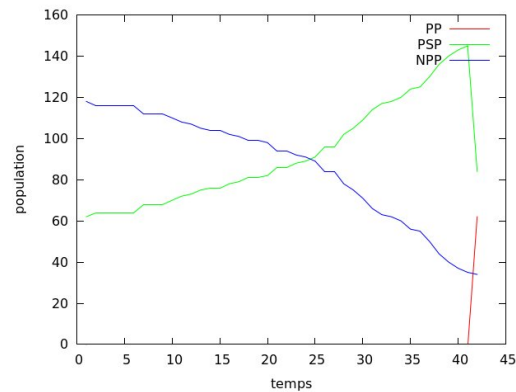


FIGURE 7.6: Courbe représentant la formation de trois compartiments PSP, PP et NPP consécutive à la perception d'un stimulus par les individus non paniqués. À $t = 41$ la population NPP comprend 34 individus, la population PSP comprend 84 individus et la population PP comprend 62 individus.

7.4 Phase de contagion : propagation de la panique sans la mobilité

Nous étudions dans cette partie l'effet de la variation de certaines propriétés de l'individu sur la propagation de la panique dans une foule statique. Nous nous inté-

7.4. Phase de contagion : propagation de la panique sans la mobilité

ressons en particulier à l'estimation de nouveaux cas de panique obtenus dans le cas où la panique se propage par interactions sociales entre les individus susceptibles de paniquer et les individus paniqués, en d'autres termes la phase de contagion de la panique.

À notre connaissance, la littérature ne propose pas de quantification des taux de croissance de l'intensité d'une émotion ainsi que les valeurs des taux d'influence de la personnalité sur cette dernière. Nous savons seulement que l'intensité d'une émotion évolue temporellement, *a priori* selon la personnalité, lorsqu'un stimulus émotionnel apparaît et décroît pour atteindre un état neutre à la disparition de ce dernier [86, 74]. Nous faisons néanmoins varier la valeur de ces taux afin d'étudier leurs influences sur la diffusion de la panique dans une foule. Nous présentons dans cette section les résultats que nous avons obtenus à partir de trois scénarios où nous avons examiné le comportement de la panique suite à la variation :

- De la valeur du champ de vision des individus ;
- Des valeurs des taux de transitions ;
- De la densité de la population et de la dispersion des individus dans l'espace.

7.4.1 Effet du réseau social sur la diffusion de la panique

Le réseau de contact humain joue un rôle important dans la propagation de la panique. Pour illustrer cette hypothèse, nous observons un scénario où l'environnement est perturbé par un stimulus émotionnellement négatif : « un incendie ». Nous partons d'une population issue de la phase d'infection (section 7.3). La population est composée de 50 individus non paniqués, 50 individus paniqués et 70 individus susceptibles de paniquer répartis aléatoirement dans l'espace¹. Nous répartissons également les individus aléatoirement dans l'espace émotionnel (RIC space) selon leurs compartiments. Afin de simplifier cette première étude, nous choisissons de doter dans un premier temps tous les individus de la population d'une même personnalité (*i.e* neurotique ou extravertie) (figure 7.2). Nous supposons que la panique ne se propage que par contact entre un individu susceptible de paniquer et un individu paniqué (figure 8.1) (*i.e* phase de contagion du modèle de propagation de la panique).

1. Nous conservons la même dispersion de la population dans l'environnement pour les trois expérimentations.

7. Expérimentations et étude des résultats

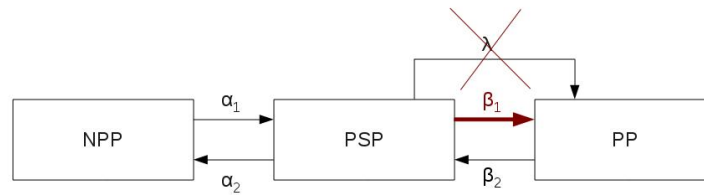


FIGURE 7.7: Modèle compartimental de propagation de la panique uniquement par contact infectieux entre les individus du compartiment PSP et ceux du compartiment PP. La probabilité de transition λ est nulle, tout comme le taux de croissance de l'émotion négative Cn_i .

Au cours des expérimentations nous faisons varier les valeurs de la distance de vision, ce qui affecte par conséquent la valeur moyenne de contact $\langle k \rangle$, la valeur du taux de contact moyen c , la force d'infection p (*i.e* calculée à partir de l'équation (7.1) et le taux d'infection β_1 . Nous illustrons cette variation dans le tableau 7.1.

$$p = 1 - e^{(-\frac{1}{c})} - 0.01 \quad (7.1)$$

TABLE 7.1: Intervalles des valeurs de la distance de vision et ses conséquences sur les paramètres $\langle k \rangle$, c , p et β_1 .

Distance de vision	$\langle k \rangle$	c	p	β_1
50m	97.48	0.57	0.81	0.96
25m	36	0.21	0.98	0.84
12.5m	11	0.06	0.98	0.3
10m	7.72	0.04	0.98	0.2
8.75m	6.13	0.03	0.98	0.166
7.5m	4.73	0.02	0.98	0.12
6.25m	3.30	0.01	0.99	0.08

7.4. Phase de contagion : propagation de la panique sans la mobilité

Distance de vision	$\langle k \rangle$	c	p	β_1
5m	2.42	0.01	0.99	0.06
4.5m	1.68	0.009	0.99	0.04
3.75m	1.16	0.006	0.99	0.03

Trois intervalles de valeurs de la distance de vision sont identifiés :

1. *distance de vision* > 5 m ;
2. *distance de vision* $\in]4.5$ m , 5 m] ;
3. *distance de vision* ≤ 4.5 m.

***Distance de vision* > 5 m**

Dans ce scénario, la panique se propage rapidement dans la population avec un taux d'infection $\beta_1 > 0.06$. La courbe de diffusion de la panique peut être décomposée en trois phases (figure 7.8) :

- Dans la première phase nous notons : une décroissance du nombre d'individus de la population PSP et NPP, suivie par une légère croissance de la population PSP avant une extinction totale de ces deux dernières populations ; une croissance de la population PP jusqu'à une stabilisation de sa taille (*i.e* taille de la population étudiée).
- Dans la deuxième phase, nous observons une décroissance de la population PP. Cette décroissance s'explique par l'atteinte des individus paniqués du seuil de la panique (*i.e* $Relevance = -1$ et $Implication = -1$). La population PSP réapparaît donc avec une population composée d'individus dans un état de calme partiel.
- Dans la troisième phase, la courbe devient périodique, alternant une croissance légère de la population PP et par conséquent une décroissance de la population PSP et réciproquement.

7. Expérimentations et étude des résultats

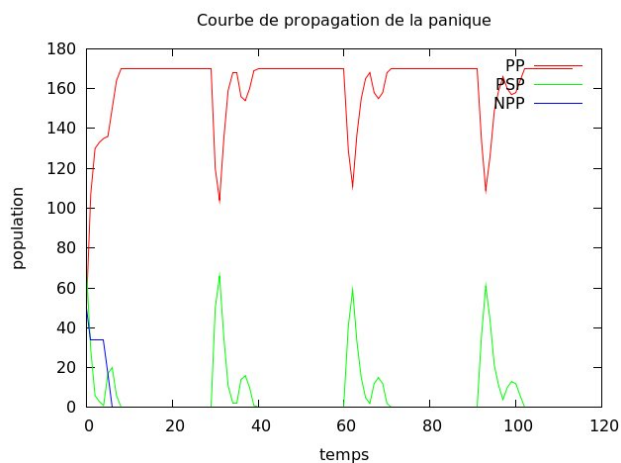


FIGURE 7.8: Courbe indiquant le nombre d'individus NPP, PSP et PP dans une population statique composée initialement de 50 individus paniqués, 70 individus susceptibles de paniquer et 50 individus non paniqués. Chaque individu admet un champ de vision $\phi_{(x,y)}(t)$ de distance $d = 50m$ et un d'angle égale à 360° . Avec $Dp_i = 0.5$ taux de décroissance de l'émotion positive, $Cpanic_i = 0.1$ taux de croissance de l'émotion de panique et $Dpanic_i = 0.01$ taux de décroissance de l'émotion de panique.

Cette courbe de propagation de la panique traduit l'effet produit par les interactions entre les individus susceptibles de paniquer et les individus paniqués. Avec un taux de contact important dû à une capacité de perception assez conséquente et avec un taux de contagion β_1 assez grand (0.6), la panique se propage rapidement dans la population. La décroissance de l'émotion de panique provoque par la suite la transition de l'individu paniqué vers le compartiment PSP (figure 7.9). Ce qui provoque par la suite sa contagion de la panique au contact d'un individu paniqué. Ce comportement explique d'ailleurs cette périodicité dans la courbe 7.8.

7.4. Phase de contagion : propagation de la panique sans la mobilité

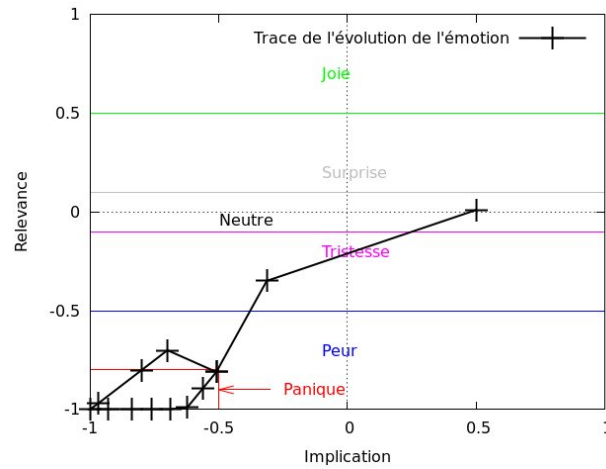


FIGURE 7.9: Trace de l'évolution de l'émotion d'un individu non paniqué avec une émotion initiale *neutre* à $t = 0$. La perception du stimulus négatif fait décroître l'émotion positive et le fait transiter vers le compartiment des individus susceptibles de paniquer. Une fois dans le compartiment PSP, l'individu devient une cible pour contracter la panique au contact d'un paniqué. En contractant la panique, l'individu passe au compartiment des individus paniqués, son émotion de panique croît jusqu'à atteindre le seuil de panique puis décroît progressivement. À partir de cette phase, l'individu entre dans une boucle émotionnelle entre décroissance de l'émotion de panique et contagion de la panique par interactions sociales avec les individus PP.

Distance de vision $\in]4.5 \text{ m} , 5 \text{ m}]$

Nous observons dans ce scénario une modification de l'allure de la courbe de propagation de la panique (figure 7.10). En effet, la courbe comporte deux phases :

- Première phase : Nous observons une croissance du nombre d'individus dans le compartiment PSP ainsi que le nombre d'individu dans le compartiment PP. En revanche nous notons une décroissance du nombre d'individu du compartiment PSP jusqu'à l'extinction ;
- Deuxième phase : le nombre d'individu du compartiment PP décroît provoquant ainsi une croissance de la taille de la population PSP. La courbe se stabilise par la suite avec une population PSP plus importante que celle des PP.

7. Expérimentations et étude des résultats

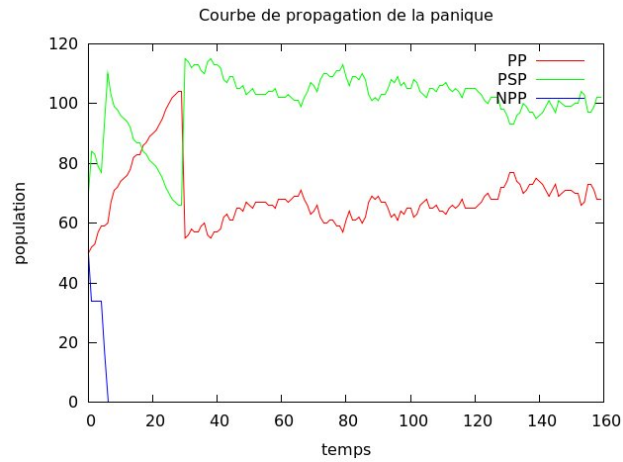


FIGURE 7.10: Courbe indiquant le nombre d'individus NPP, PSP et PP dans une population statique composée initialement de 50 individus paniqués, 70 individus susceptibles de paniquer et 50 individus non paniqués. Chaque individu admet les mêmes propriétés que ceux de la population de la figure 7.8. La *distance de vision* est égale à $5m$.

Distance de vision $\leq 4.5 m$

Ce scénario nous permet d'obtenir la courbe de la figure 7.11. Nous notons une décroissance de la densité de la population PP jusqu'à la disparition. Le processus de contagion est en effet affaibli non seulement par le faible taux de contact $c \leq 0.09$ mais aussi par le faible taux de contagion $\beta_1 \leq 0.04$. En effet, la faible intensité de ces deux taux réduit considérablement les risques de contracter la panique pour les individus susceptibles de paniquer et donc la diffusion de la panique par seule force d'interaction sociale.

7.4. Phase de contagion : propagation de la panique sans la mobilité

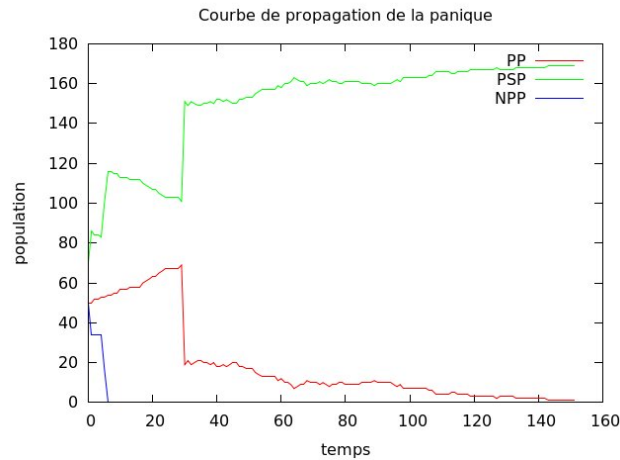


FIGURE 7.11: Courbe indiquant le nombre d'individus NPP, PSP et PP pour la même population initiale que la figure 7.10. La *distance de vision* est cependant égale à $3.75m$

Conclusion

À l'issue de ces trois scénarios nous observons une différence dans la propagation de la panique dans une même population d'individus. Ce qui représente bien l'effet de la transmissibilité sur la diffusion de la panique. La panique peut ainsi s'étendre et survivre dans la foule pour un taux de contact moyen supérieur à 2 individus, au dessous de ce taux la panique disparaît. Ces scénarios nous ont permis de mieux comprendre le processus de diffusion de la panique. Ils montrent que seule une forte baisse du champ de vision des individus arrête la propagation de la panique. Cependant cette réduction du champ de vision n'est possible que par isolement ou par implantation d'obstacles dans l'environnement obstruant ainsi l'étendue du champ visuel de l'individu. Ces constatations peuvent servir comme référence pour les stratégies de protection de la population lors d'une catastrophe, où la mobilité des individus est quasi-nulle (*e.g* file d'attente devant une entrée du stade). L'isolement de la population paniquée du reste de la population et la gestion en premier des régions de l'environnement fortement connectées permettent de contenir la panique et de bloquer sa propagation dans la foule. Nous étudions justement dans la section 7.4.4 l'impact de la topologie du réseau de contacts de la foule sur la diffusion de la panique.

7. Expérimentations et étude des résultats

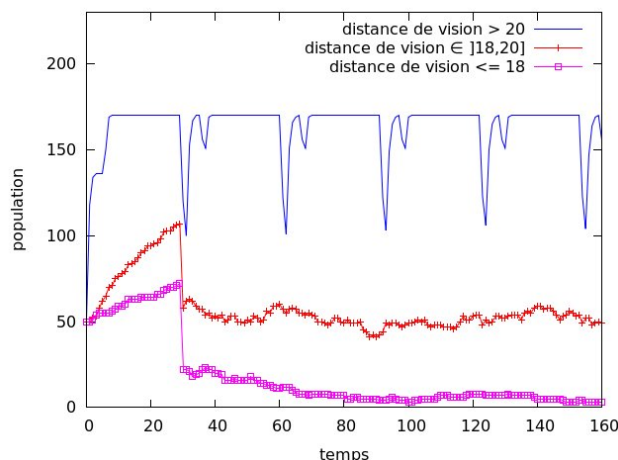


FIGURE 7.12: Effet du réseau social sur la diffusion de la panique sur une population initiale statique composée de 50 individus paniqués, 70 individus susceptibles de paniquer et 50 individus non paniqués. Les courbes représentent le nombre d'individus paniqués en fonction du temps issu des expérimentations précédentes. Nous observons une propagation de la panique pour une distance de vision $d > 5 m$, soit un nombre de voisinage $\langle k \rangle \geq 2$.

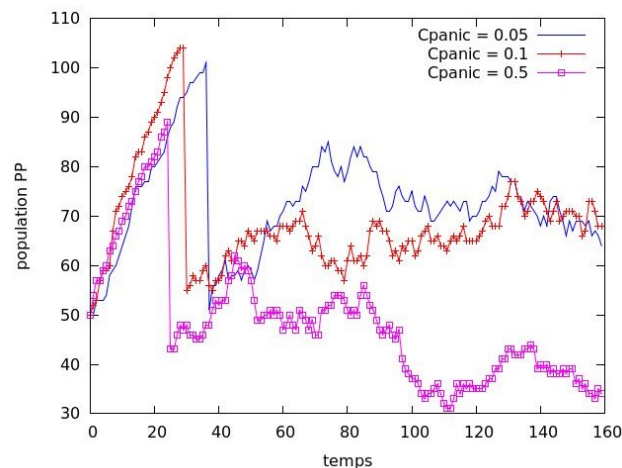
7.4.2 Effet de la dynamique de l'émotion sur la diffusion de la panique

Notre but ici est d'observer l'influence des facteurs de croissance et de décroissance de l'intensité des émotions sur la diffusion de la panique. En effet, lors d'un événement catastrophique de nombreux paramètres affectent l'intensité de l'émotion ressentie. Nous pouvons imaginer par exemple une présence rapide des secours dans le lieu de danger pour limiter le risque de débordement et d'effolement de la population. Nous proposons d'illustrer cette hypothèse en faisant varier les valeurs du taux de croissance C_{panic_i} et du taux de décroissance D_{panic_i} de l'émotion de panique, tout en fixant un seuil de panique pour une valeur de $Relevance = -1$, d' $Implication = -1$ et de $Dominance = -1$. Les deux courbes des figures 7.13(a) et 7.13(b) montrent l'évolution du nombre d'individus paniqués pour trois différentes valeurs du taux de croissance de l'émotion de panique ; 0.05, 0.1 et 0.5. Nous sommes dans l'hypothèse où la panique décroît lentement $D_{panic_i} = 0.01$ pour la courbe 7.13(a) et plus vite $D_{panic_i} = 0.1$ pour la courbe 7.13(b). Nous constatons une faible propagation de la panique dans la population lorsque le taux de décroissance est important (*i.e* $D_{panic_i} = 0.1$). En effet, l'atteinte rapide du seuil de la panique et également la décroissance rapide de l'intensité de l'émotion de panique favorisent l'extinction de ce fléau en bloquant sa propagation dans la foule.

7.4. Phase de contagion : propagation de la panique sans la mobilité

Lorsque la panique dure une période de temps assez faible chez l'individu, il est possible de réduire les risques d'une propagation sur l'ensemble de la population. La détection et la gestion des paramètres qui permettent de baisser la durée de la panique peuvent fortement contribuer à mieux gérer les situations catastrophiques et à diminuer leur ampleur, car c'est souvent le comportement de la foule qui augmente l'ampleur des dégâts plus que la catastrophe elle-même.

Maitriser la croissance du sentiment de panique est éventuellement faisable mais difficile à réaliser, car l'interprétation subjective par l'individu de son environnement est obérée par l'émotion de panique. L'aptitude à se maîtriser et à contrôler l'intensité de la peur ressentie varie donc selon l'expérience personnelle de chaque individu face au danger et de sa connaissance des risques qu'il encourt. Cet apprentissage requiert désormais une durée difficile à estimer. Favoriser la diminution du sentiment de panique chez l'individu est en revanche « plus facile » à effectuer, puisqu'il dépend de l'incidence du danger sur l'environnement. Une réduction des conséquences de la catastrophe sur l'environnement suffit en effet à réduire la transmission de la panique et à bloquer la propagation de ce phénomène à l'ensemble de la foule. La figure 7.14 nous montre justement qu'il est possible d'agir sur la diffusion de la panique en contrôlant le taux de décroissance de l'intensité de l'émotion de panique chez les individus. Nous pouvons voir qu'il est possible de bloquer la propagation de la panique dans l'hypothèse où le taux de décroissance atteint une valeur de supérieur à 0.03.



7. Expérimentations et étude des résultats

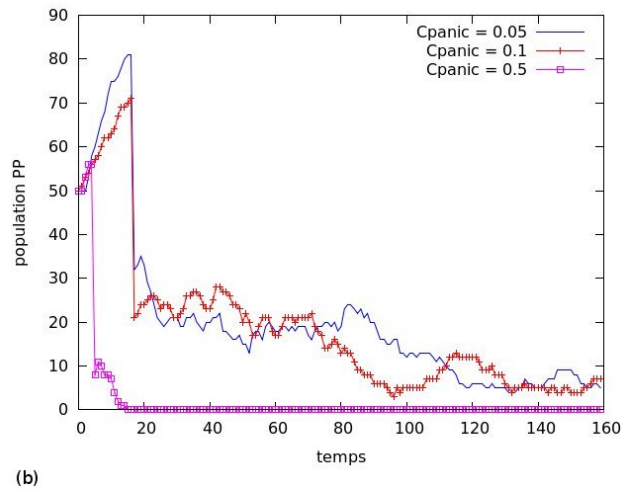


FIGURE 7.13: Les courbes (a) et (b) montrent l'effet de la dynamique de l'émotion sur la diffusion de la panique. Nous partons d'une population initiale composée de 50 individus NPP, de 50 individus PSP et de 70 individus PP. Chaque individu admet un champ de vision $\phi_{(x,y)}(t)$ de distance $d = 5 m$ et un d'angle de vision égal à 360° . Avec un taux de décroissance de l'émotion positive $Dp_i = 0.5$, un seuil de panique pour une valeur de *Relevance* = -1 , d'*Implication* = -1 et de *Dominance* = -1 . Nous fixons le taux de décroissance de la panique à 0.01 pour la courbe (a) et à 0.1 pour la courbe (b).

7.4. Phase de contagion : propagation de la panique sans la mobilité

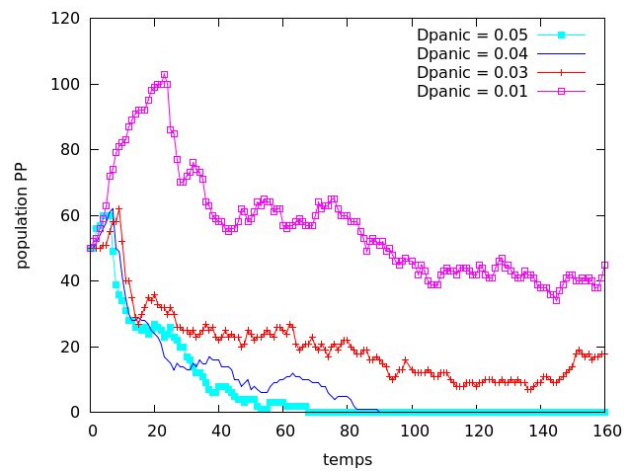


FIGURE 7.14: Conséquence de la variation du taux de décroissance de la panique sur la diffusion de la panique dans une population composée de 50 individus NPP, de 50 individus PSP et de 70 individus PP. Chaque individu admet un taux de croissance de la panique égal à 0.1, un champ de vision $\phi_{(x,y)}(t)$ de distance $d = 5 m$ et un d'angle de vision égale à 360° .

Remarque 7.4.1. *La variation brutale dans les courbes des figures 7.10, 7.11, 7.12, 7.13, 7.14 et 7.15 représente une transition simultanée d'un ensemble des individus d'un compartiment à un autre. En effet, comme nous l'avons précisée précédemment, nous avons procédé à la dispersion aléatoire de l'état émotionnel des individus dans l'espace des émotions (RIC space). Toutefois, cette dispersion peut engendrer des états émotionnels similaires ou proches pour un certain nombre d'individu, ce qui provoque par conséquent une évolution de l'état émotionnel quasi-identique et donc l'atteinte simultanée d'un nouveau état émotionnel.*

7.4.3 Effet de la virulence du stimulus sur la diffusion de la panique

La diffusion de la panique dépend non seulement des caractéristiques de la population hôte mais aussi de la nature du stimulus. En effet, la virulence de ce dernier joue un rôle important dans la diffusion de la panique dans la foule. Nous proposons d'illustrer cette hypothèse en faisant varier la probabilité d'infection p sur une population composée d'individus avec un même champ de vision. La figure 7.15 montre l'évolution du nombre d'individus paniqués pour une distance de vision égale à 7.5 m (proche de la distance moyenne de perception d'un humain sans accommodation (*i.e.* Punctum remotum $\simeq 6$ m)). Nous pouvons observer que la panique touche presque 80% de la population pour une perturbation assez virulente ($p = 0.98$). Cependant le pourcentage des individus paniqués se réduit à environ 40% pour une probabilité d'infection p égale à 0.59. Elle disparaît en revanche pour une perturbation peu virulente où la probabilité d'infection p est égal à 0.29.

7.4. Phase de contagion : propagation de la panique sans la mobilité

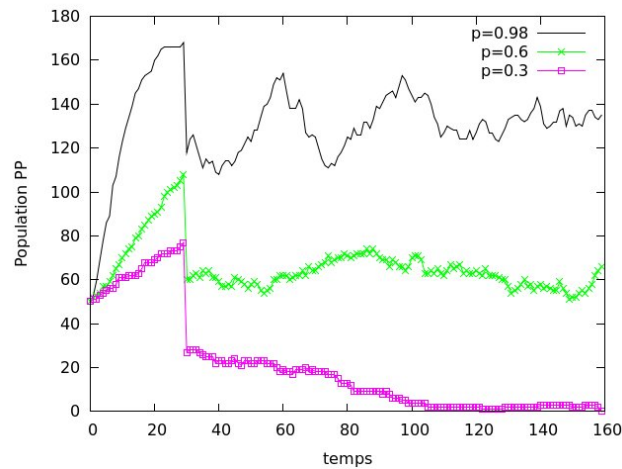


FIGURE 7.15: Effet de la virulence du stimulus sur la diffusion de la panique. La population initiale est composée de 170 individus dont 50 individus NPP, 50 individus PP et 70 individus PSP. Les valeurs des taux de croissance et de décroissance de la panique valent 0.1 et 0.01. Le taux de décroissance de l'émotion négative $Dp_i = 0.5$. Chaque individu admet un champ de vision $\phi_{(x,y)}(t)$ de distance $d = 7.5$ m et un d'angle de vision égal à 360° .

7.4.4 Effet de la distribution des individus sur la diffusion de la panique

Distribution agrégative

La topologie du réseau de contact le long duquel se transmet la panique joue un rôle important dans le processus de diffusion de cette dernière. En effet, le risque de propagation de la panique augmente dans une population où les individus sont en forte interaction et diminue dans le cas contraire. Nous avons montré dans la section 7.4.1 que la panique peut s'étendre dans une foule pour un taux de contact moyen supérieur à 2 individus et que seul une réduction du champ de vision de ces derniers peut provoquer la disparition de la panique. L'isolement des populations infectées est donc une solution à prendre en compte dans les situations de danger. Nous procédons dans cette section à l'étude de cette hypothèse en observant un premier scénario avec une population composée de deux groupes d'individus non connectés : un premier groupe avec un taux de contact moyen égal à 2 individus et un deuxième groupe avec un taux de contact moyen égal à 6 individus (figure 7.16). Le deuxième scénario est formé par la même population que le scénario précédent, nous lui ajoutons cependant un troisième groupe afin de lier les deux groupes d'individus (figure 7.17).

7. Expérimentations et étude des résultats

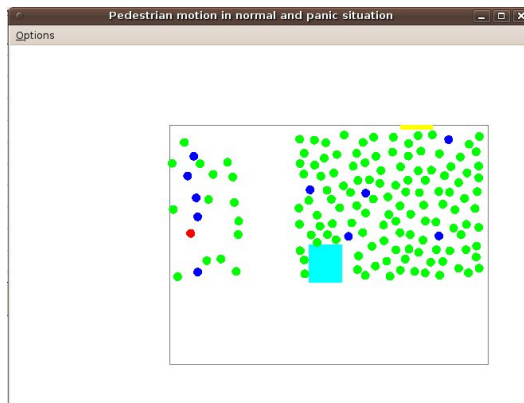


FIGURE 7.16: Population initiale composée de deux groupes d'individus non connectés où chaque individu possède un champ de vision d'angle égale à 360° et de distance de vision égale à 6.25 m . Le premier groupe (*le groupe (1)*) admet un taux de contact moyen $k = 2$ et est composé de 15 individus susceptible de paniquer, un individu paniqué et 5 individus non paniqués. Le deuxième groupe (*le groupe (2)*) d'individus possède un taux de contact moyen $k = 6$ et est composé de 120 individus susceptibles de paniquer et 5 individus non paniqués.

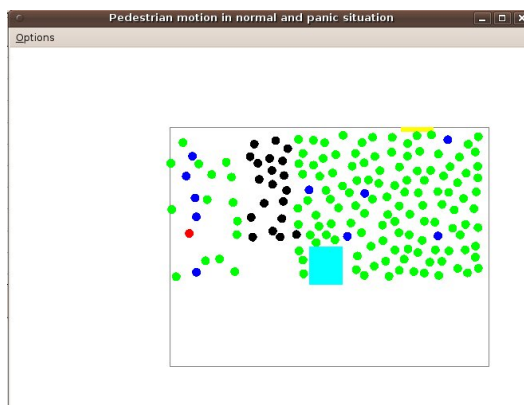


FIGURE 7.17: Population initiale composée de 3 groupes d'individus. Deux groupes dont la répartition spatiale est similaire aux groupes d'individus du scénario précédent. Le troisième groupe (*le groupe (3)*) forme un lien entre les deux groupes 1 et 2. Il est composé de 20 individus susceptibles de paniquer (noir) et admet un taux de contact moyen de $k = 6$.

7.4. Phase de contagion : propagation de la panique sans la mobilité

La figure 7.18 montre l'évolution de la diffusion de la panique dans le premier scénario consécutivement à la perception du signal de danger (*i.e incendie*). Nous pouvons observer une absence de diffusion de la panique dans toute la population en raison d'un taux de contact moyen assez faible et de la non-connexion entre les deux groupes d'individus². En revanche, la figure 7.19 montre une diffusion de la panique dans la quasi-totalité de la population simulée causée par la présence d'individus liants la population à faible interaction (*i.e* groupe 1) à la population à forte interaction (*i.e* groupe 2). La panique se propage donc plus rapidement et plus facilement dans une population à forte interaction entre ses membres (figure 7.20).

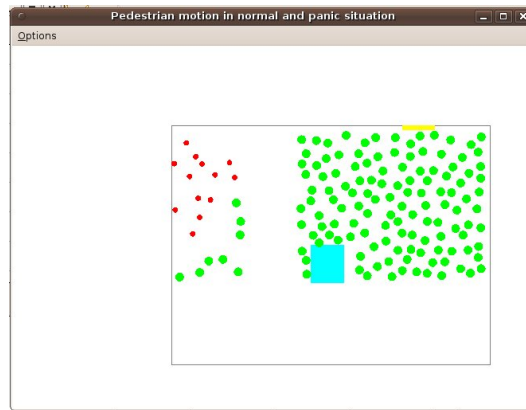


FIGURE 7.18: Illustration de la diffusion de la panique dans la population du premier scénario. En l'absence d'interaction entre les deux groupes d'individus la panique ne se diffuse pas dans la population simulée.

2. Ce résultat est bien sûr évident, il permet de fixer un état de référence.

7. Expérimentations et étude des résultats

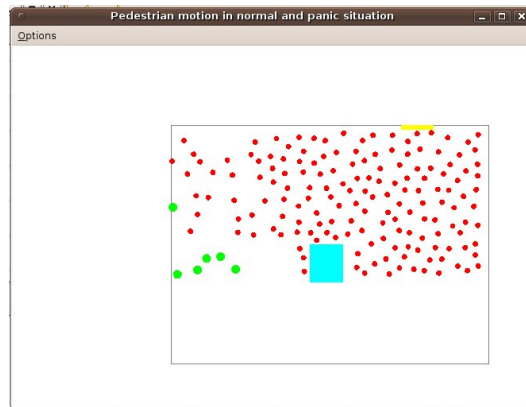


FIGURE 7.19: Illustration de la diffusion de la panique dans la population du deuxième scénario. La panique se diffuse dans toute la population simulée consécutivement à l'infection des individus du groupe 2 qui admet une forte interaction entre ses membres.

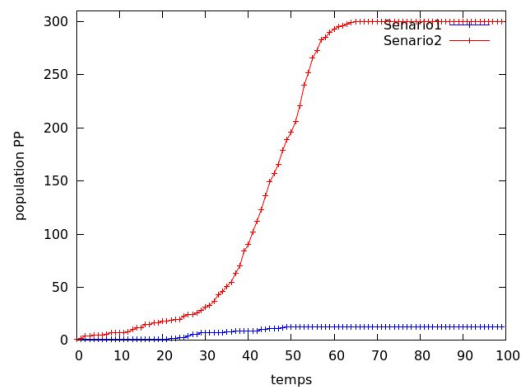


FIGURE 7.20: Effet du taux de contact entre les individus sur la propagation de la panique. Le nombre d'individus paniqués est largement important dans une population où les individus admettent de fortes interactions.

Nous proposons un troisième scénario dans lequel le troisième groupe n'est composé que de 5 individus susceptibles de paniquer à faible interaction entre ses membres (figure 7.21). Nous observons que la panique n'atteint pas ce groupe et ne se diffuse pas par conséquent dans la population (7.22). Ces constatations nous permettent de confirmer notre hypothèse et montrer que l'isolement d'une population prise au hasard est inefficace si on désire bloquer la diffusion de la panique, seule une stratégie fondée sur la protection des populations fortement connectés (*i.e* groupe

7.4. Phase de contagion : propagation de la panique sans la mobilité

2 dans notre cas d'étude) qui sont des « super-propagateurs » assure le contrôle de la situation et évite tout débordement.

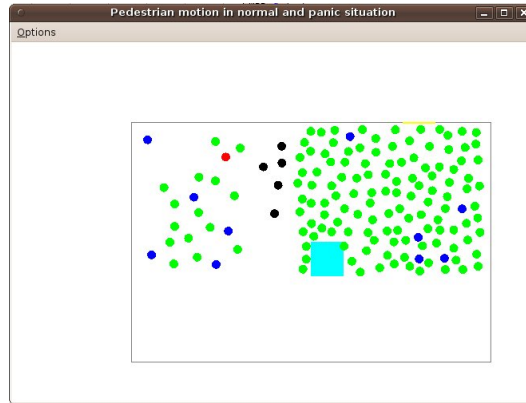


FIGURE 7.21: Illustration de la diffusion de la panique pour une population initiale formée par les deux groupes 1 et 2 des scénarios précédent et d'un troisième groupe avec 5 individus susceptibles de paniquer (noir). Les individus admettent un angle de vision et une distance de vision équivalente aux scénarios précédents.

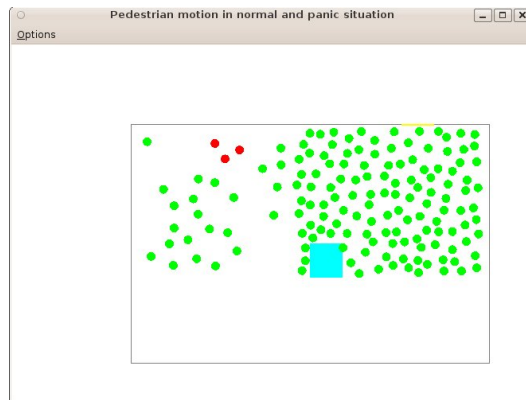


FIGURE 7.22: Illustration de la diffusion de la panique dans le troisième scénario. Nous observons une absence de diffusion de la panique dans la population globale due à l'isolement de la population à forte interaction entre ses membres *i.e* (le groupe (2)).

7.5 La phase de contagion : propagation de la panique avec la mobilité

Notre modèle est fondé sur des individus autonomes (chapitre 5.3.4) capable de réagir et de prendre des décisions qui leur permettent de s'adapter aux changements que subit leur environnement. Consécutivement à un danger les comportements de chaque individu simulé varient, la panique peut s'installer et les décisions prises deviennent ainsi non-rationnelles ou de « rationalité limitée » selon les termes de Quantelli (chapitre 3.2.1). Dans notre approche de modélisation, l'émergence de cette panique provoque des variations des attitudes de déplacement. Elle va non seulement affecter les comportements réactifs tels que la réduction de l'espace personnel de confort, l'annulation du comportement d'attente et l'activation de comportements de poussée mais aussi les comportements cognitifs tels que le processus de recherche du chemin. La mobilité des individus favorise en effet la diffusion de la panique dans la foule puisque la chaîne de contagion peut se poursuivre lors de déplacement d'un individu et donc permettre à la panique d'atteindre les groupes isolés.

7.5.1 Effet de la mobilité sur le processus de propagation de la panique

La mobilité des individus joue un rôle important dans la propagation de la panique. Elle permet en effet d'augmenter considérablement le risque de contagion en permettant aux individus infectés d'être en interaction avec un plus grand nombre de personnes. Le processus de diffusion de la panique se poursuit donc dans la foule entière et suit les trajectoires de déplacement. Il est concevable en effet que dans une foule la mobilité humaine disparaît. Nous pouvons imaginer par exemple un lieu où les individus cessent de se déplacer afin d'apprécier une vue ou un spectacle. La perception d'un danger peut faire changer les comportements et pousser les individus à se diriger vers un lieu sûr. Une éventuelle apparition de la panique dans cette foule mobile peut induire une propagation rapide de la panique, qui atteint les groupes isolés comme le montre la figure 7.23.

La panique conjuguée à la mobilité amplifie considérablement la dangerosité de la perturbation ressentie, ce que nous montre justement la figure 7.24 où une grande disparité existe dans l'évolution temporelle du nombre d'individus paniqués d'une même population en présence et en absence de la mobilité.

7.5. La phase de contagion : propagation de la panique avec la mobilité

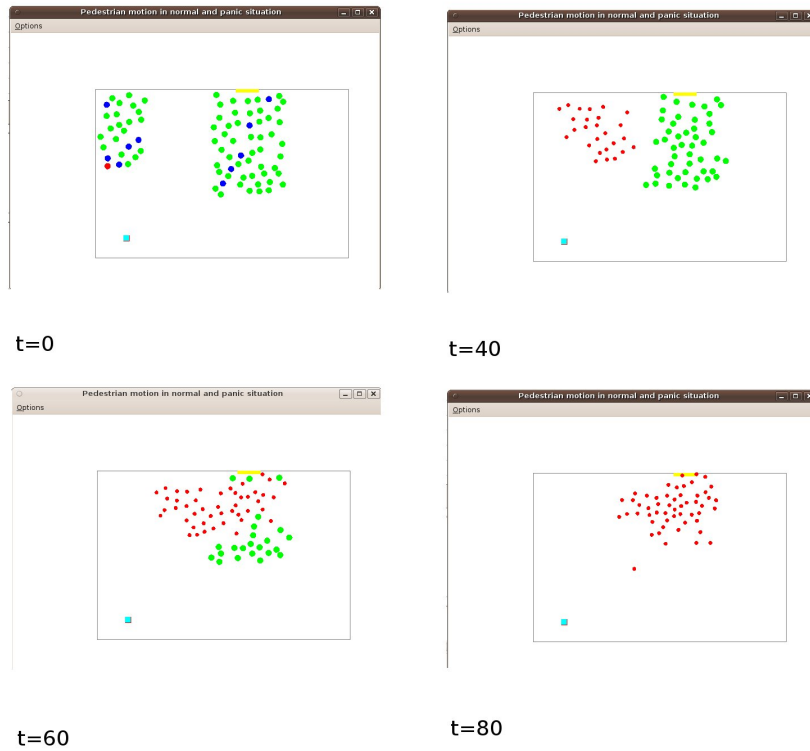


FIGURE 7.23: Évolution de la propagation de la panique dans une population de faible densité composée de deux groupes isolés. Un premier groupe formé par un individu paniqué, 5 individus non paniqués et 20 individus susceptibles de paniquer. Un deuxième groupe est formé par 5 individus non paniqués et 30 individus susceptibles de paniquer. Les paramètres de chaque individu sont : un champ de vision $\phi_{(x,y)}(t)$ de distance $d = 6.25 \text{ m}$, un d'angle de vision égal à 360° , $Dp_i = 0.001$, $Cp_i = 0.1$, $Dn_i = 0.1$ et $Dp_i = 0.5$. Chaque individu du compartiment PSP et NPP admet une vitesse $V = 0.75 \text{ m}$ à chaque pas de temps. Un individu paniqué admet en revanche une vitesse $V = 1.5 \text{ m}$. On observe une diffusion totale de la panique sur l'ensemble de la population suite à l'interaction du groupe infecté avec le deuxième groupe sain (PSP).

7. Expérimentations et étude des résultats

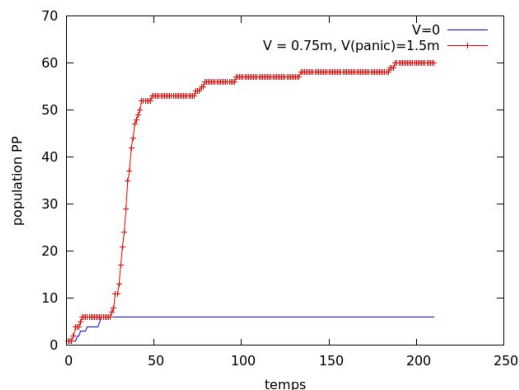


FIGURE 7.24: Effet de la mobilité sur l'évolution de la panique. Les courbes représentent le nombre d'individus paniqués en fonction du temps d'une population composée de deux groupes isolés. Un premier groupe formé par un individu paniqué, 5 individus non paniqués et 20 individus susceptibles de paniquer. Un deuxième groupe est formé par 5 individus non paniqués et 30 individus susceptibles de paniquer. Les paramètres des individus sont équivalents à ceux de la population de la figure 7.23. Nous observons une propagation plus rapide de la panique dans la population mobile. Le nombre d'individus paniqués devient stable à un seuil de 6 individus à $t = 20$ pour la population statique et à $t = 10$ pour la population mobile. Ce seuil correspond au nombre de voisins infectés au voisinage de l'individu paniqué, la mobilité augmente le taux de contact c entre les voisins et par conséquent le taux d'infection β_1 . Ce qui permet justement d'accélérer l'infection des voisins de l'individu paniqué. Le nombre de personnes paniquées reste stable dans la première courbe, en revanche, il croît considérablement jusqu'à atteindre un seuil de 60 individus à $t = 188$ dans la deuxième courbe. La panique favorise désormais la diffusion de la panique au voisinage de l'individu infecté pour ensuite regagner les individus les plus éloignés.

7.5.2 Effet de la propagation de la panique sur la mobilité

La mobilité et la panique forment un système complexe, elles interagissent et s'influencent mutuellement, ce qui fait apparaître des propriétés émergentes d'amplification et/ou de régulation. La panique modifie en effet le patron de mobilité en modifiant l'écoulement du système. Elle provoque une variation des propriétés physiques et psychologiques des individus ce qui rend le processus d'évacuation de plus en plus difficile. Nous pouvons observer dans la figure 7.25 une séquence d'image qui illustre une diffusion progressive de la panique dans une population. Le processus de propagation dans cet exemple est rapide car la foule présente un fort taux d'interaction au sein de ses membres. La panique se diffuse dans la foule et provoque une variation des comportements et l'émergence de nouvelles propriétés. Nous proposons dans cette section de présenter certains de ces comportements à travers desquels nous étudions l'influence de la panique sur la mobilité.

7. Expérimentations et étude des résultats

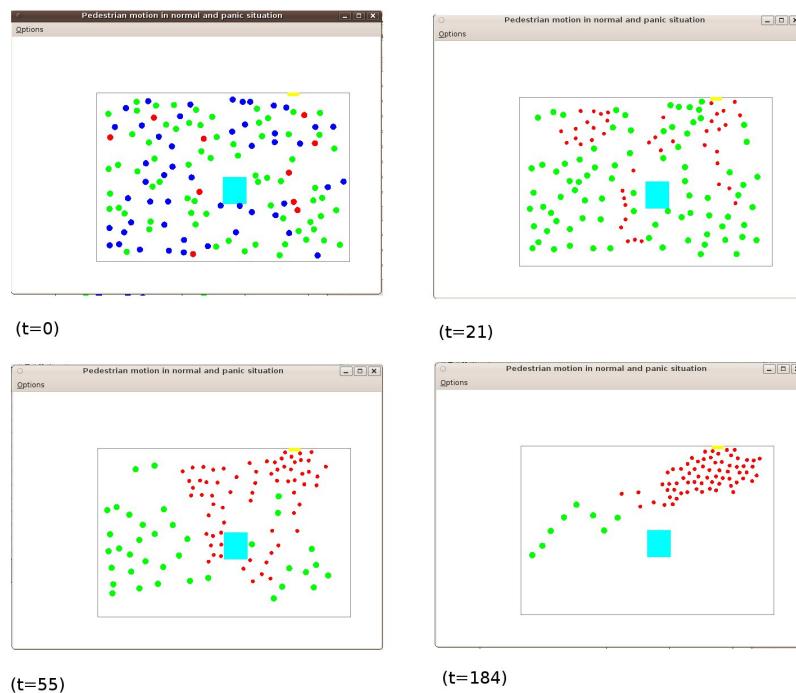


FIGURE 7.25: Séquence de propagation de la panique dans une population en mouvement. La foule est constituée de 50 individus NPP, 10 individus PP et 70 individus PSP. L'environnement représente une pièce avec une seule sortie (en jaune) et un seul obstacle (en bleu). Chaque individu admet un taux de croissance de la panique $Cp_i = 0.1$, un taux de décroissance de la panique égal à $Dp_i = 0.001$, un taux de décroissance de l'émotion positive $Cp_i = 0.5$, un taux de décroissance de l'émotion négative $Dn_i = 0.01$, un champ de vision $\phi_{(x,y)}(t)$ de distance $d = 6.25 m$ et un d'angle de vision égale à 360° . Nous observons une disparition totale de la population NPP suite à la perception du danger et une propagation rapide de la panique à l'ensemble de la population.

Formation d'arche devant une sortie

L'évacuation de la foule en l'absence de panique est bien coordonnée et régulière. Chaque individu simulé conserve une vitesse de déplacement $V = 0.75 m$ à chaque pas de temps ainsi qu'une distance de confort $D_i = 1.25 m$ par rapport aux autres individus de son voisinage. Le calme des individus assure une cohérence des comportements et surtout une coopération entre personnes dans des situations conflictuelles. Cependant, en présence de panique, nous observons une succession irrégulière d'arches devant la sortie (figure 7.26). Ce phénomène est compatible avec

7.5. La phase de contagion : propagation de la panique avec la mobilité

les observations empiriques présentées dans divers travaux de recherche comme dans les travaux de Helbing [57]. En effet, l'augmentation de la vitesse des individus due à la panique $V = 1.5 m$ à chaque pas de temps, la réduction de l'espace de confort des individus à $0.75 m$ et l'absence de comportement « rationnel » comme la coopération dans les situations de conflit, favorisent les comportements « non rationnels » inadaptés à la situation dans laquelle se trouvent les personnes.

Dans cette conduite « individualiste » les individus paniqués tendent à atteindre au plus vite la sortie, se bousculent, créent un bouchon au niveau de la sortie et amplifient par conséquent l'ampleur du danger.

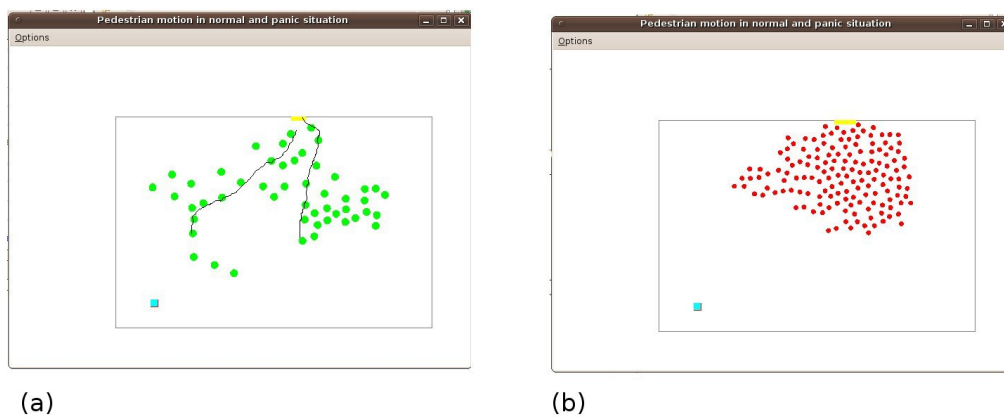


FIGURE 7.26: Simulation de déplacement des individus vers une sortie en absence et en présence de la panique pour une population initiale composée de 70 individus. Dans la population (a) les individus sont susceptibles de paniquer, ils ont une vitesse $V = 0.75m$ à chaque pas de temps. Les déplacements sont coordonnés et réguliers, nous pouvons observer l'apparition d'un comportement émergent de formation de ligne en direction de la sortie. Dans la population (b) tous les individus sont paniqués. Nous observons une formation d'arche devant la sortie résultat d'un changement des comportements dû à l'amorce et la propagation de la panique.

Phénomène de prise en masse

Le phénomène de prise en masse est un phénomène qui se produit dans des situations de forte densité et consiste en un ralentissement de l'écoulement du flux d'évacuation jusqu'à l'immobilisation totale des individus. L'immobilité est en effet causée par le désir des individus d'atteindre leur destination. La tentative de chacun de se déplacer est la cause du blocage mutuel de tous les individus. La panique vient accentuer ce phénomène en détruisant les lignes formées par les individus de même destination sous l'effet de l'impatience. Afin d'illustrer ce phénomène nous

7. Expérimentations et étude des résultats

proposons un scénario pour une population de 200 individus que nous divisons en deux groupes. Dans le but d'accélérer l'apparition du phénomène, nous attribuons à chaque individu de chaque groupe la sortie située dans la partie de l'environnement occupée par le groupe opposé. La figure 7.27 montre l'émergence du phénomène de prise en masse, ce qui provoque une variation de l'écoulement du flux d'évacuation. Dès le début de la simulation, les individus commencent à trouver des difficultés dans leurs déplacements. La courbe 7.28 montre une décroissance du nombre d'individus pouvant se déplacer vers leur destination jusqu'à atteindre une stabilité d'écoulement entre 8% et 11%. Nous observons aussi une certaine oscillation du nombre de personnes mobiles entre chaque pas de temps : elle s'explique par l'apparition d'un nouveau comportement émergent appelé « stopper et repartir (*stop and go*) ». En effet, ce phénomène est provoqué par les individus paniqués qui essaient continuellement de bouger afin d'atteindre leurs destinations, ils exploitent alors tout espace libre qu'ils perçoivent sans se soucier du risque de blocage qu'ils peuvent créer par la suite.

Nous effectuons une deuxième simulation en réduisant le nombre d'individus de la population à 100 individus paniqués. La figure 7.29 montre la variation de l'écoulement du flux d'évacuation suite à l'émergence du phénomène de prise en masse. Comme la simulation précédente, dès le début des simulations les individus montrent une difficulté dans leur déplacement, le pic de l'immobilité est atteint à $t = 9$ puis à $t = 200$. A partir de $t = 250$ l'immobilité décroît, les déplacements reprennent progressivement et les individus commencent à atteindre la sortie. Le dernier individu quitte l'environnement à $t = 365$.

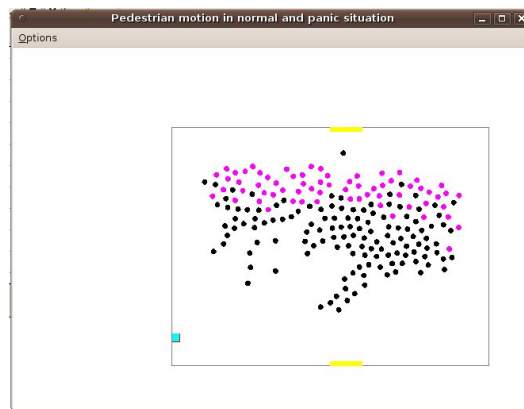


FIGURE 7.27: Émergence du phénomène de prise en masse dans une population de 200 individus paniqués en déplacement opposés (*i.e* les individus de couleur noir se déplacent vers la sortie située en haut de la pièce et les individus de couleur violette se déplacent vers la sortie située en bas de la pièce).

7.5. La phase de contagion : propagation de la panique avec la mobilité

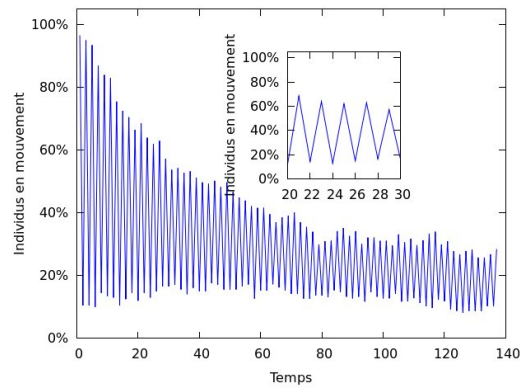


FIGURE 7.28: Effet de l'émergence du phénomène de prise en masse pour une population de 200 individus paniqués sur la mobilité des individus. Le nombre d'individus en mouvement décroît dès le début de la simulation et présente une légère stabilisation à partir de $t = 80$. La courbe présente une oscillation entre deux pas de temps traduisant l'émergence du phénomène « stopper et repartir (*stop and go*) ».

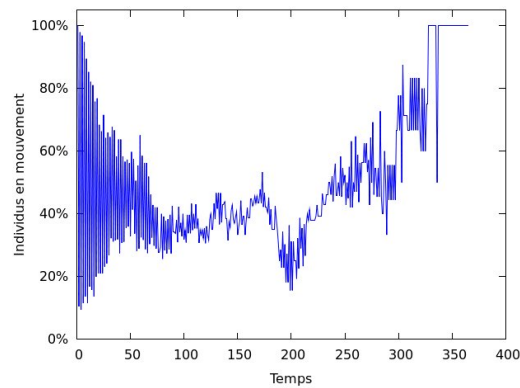


FIGURE 7.29: Effet de l'émergence du phénomène de prise en masse pour une population de 100 individus paniqués sur la mobilité des individus. Nous observons une décroissance de la mobilité des individus dès le début de la simulation. Le taux des individus mobiles croît à partir du temps $t = 250$ pour atteindre le maximum à $t = 350$ où tous les individus se déplacent vers leurs destinations respectives.

Croissance de la pression inter-individus

La propagation de la panique dans une foule augmente considérablement les interactions physiques entre les individus et amplifie par conséquent les pressions

7. Expérimentations et étude des résultats

ressenties. La foule devient dangereuse et lieu de tout dérapage menaçant la vie de ses membres. Des comportements de bousculades sont généralement observés dans ce cadre et ils sont souvent accompagnés par de chutes, de piétinements et d'étouffements de personnes. Nous proposons d'illustrer ce phénomène en traçant l'évolution temporelle de la pression d'une population de 100 individus en présence et en absence de la panique. Nous calculons la pression exercé sur chaque individu I par son voisinage selon l'expression suivante :

$$P = \sum \frac{1}{d_v} \quad \text{pour tout } v \in V \quad (7.2)$$

où V désigne les voisins de I situés dans son champ de vision $\phi_{(x,y)}(t)$ et $\frac{1}{d_v}$ désigne la distance entre I et un voisin v .

La courbe de la figure 7.30 montre une pression moyenne relativement faible dans la population en l'absence de panique. En revanche, dans la population paniquée, la pression est tellement forte qu'un arche se forme devant la sortie (figure 7.26) ralentissant ainsi l'écoulement.

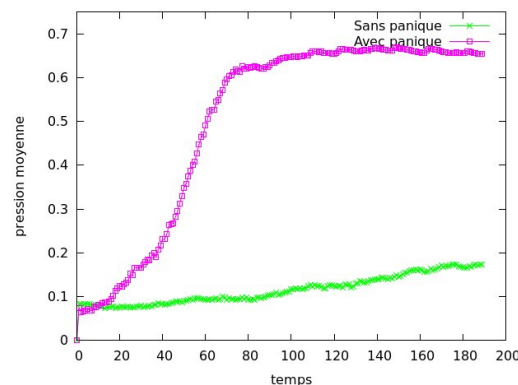


FIGURE 7.30: Impact de la panique sur la pression exercé sur les individus de la foule. La pression moyenne de la foule croit considérablement dans la foule composé de 100 individus paniqués alors qu'elle croit d'une manière très faible dans la population de 100 individus NPP.

7.6 Synthèse du chapitre

Nous avons présenté dans ce chapitre notre modèle de mobilité et de propagation de la panique. Notre but est de confronter notre modèle aux nombreux modèles

présents dans la littérature. Pour y parvenir, nous avons effectué diverses expérimentations qui nous ont permis de rapprocher nos résultats des résultats déjà obtenus tels que la formation d'arche au niveau de la sortie ou la croissance de la pression en présence de la panique. Notre approche nous permet ainsi de mettre en évidence des comportements émergents fondés sur le processus d'interaction et tenant compte de l'impact de la panique sur la mobilité en général.

Notre approche d'architecture en couche (*i.e* couche du modèle de mobilité et couche de modèle de propagation de la panique) qui s'imbrique l'une dans l'autre nous assure une flexibilité dans le développement et aussi dans l'étude de l'impact du comportement de l'individu sur le comportement de la foule. Il nous suffit en effet d'activer ou désactiver une couche pour étudier son impact sur la foule.

L'émotion et la personnalité font parties intégrantes de notre approche de modélisation. Ainsi, la prise en compte de la diversité des propriétés des individus et du rôle de l'émotion dans la prise de décision favorisent l'hétérogénéité des comportements obtenus et la crédibilité de ces derniers. La couche émotionnelle est justement à la base de notre modèle global. C'est une couche maîtresse qui partage la couche du modèle de mobilité et la couche du modèle de propagation de la panique pour prédire le comportement de chaque individu simulé.

Approche agrégative de modélisation des phénomènes de panique dans une foule

8.1	Introduction	175
8.2	Présentation du modèle dynamique	176
8.3	Étude « théorique » du modèle	178
	8.3.1 Points d'équilibre	178
	8.3.2 Propriétés à l'équilibre	179
8.4	Études numériques du modèle	180
8.5	Complémentarité entre l'approche agrégative et l'approche individu-centrée	183
	8.5.1 Description du modèle individu-centré	184
	8.5.2 Simulations et résultats	185
8.6	Synthèse du chapitre	188

8.1 Introduction

Notre approche de modélisation des phénomènes de panique est une approche mixte représentant le même système à deux niveaux de granularité différents : un niveau microscopique fondé sur l'approche individu centrée et un niveau macroscopique fondé sur un formalisme mathématique proposé dans le cadre des systèmes dynamiques. Cette démarche de travail permet de renforcer la complémentarité entre les modèles dynamiques macroscopiques et les modèles comportementaux microscopiques pour traiter les phénomènes concrets sur diverses échelles ou de description. Nous avons entamé notre travail de recherche par l'approche microscopique, ce qui nous a permis d'étudier l'apport de la diversité des individus et l'hétérogénéité des comportements sur la mobilité et sur le processus de propagation de la panique. Nous développons dans ce chapitre l'approche macroscopique (agrégative), en nous focalisant plus particulièrement sur l'aspect système dynamique. Nous présentons

les différentes étapes de la modélisation ainsi que l'analyse de la dynamique de croissance de la population d'individus paniqués et la dynamique de diffusion de la panique dans la foule.

8.2 Présentation du modèle dynamique

L'approche agrégative est une approche descriptive qui a pour but de décrire l'évolution d'un système complexe, comme la foule, par la dynamique de ses variables. C'est en effet l'évolution de la population en général qui est décrite et non l'évolution des individus eux-mêmes. Le plus souvent, cette évolution est considérée comme continue dans le temps, ce qui se traduit mathématiquement par un système d'équation différentielles ordinaires (EDO) dans notre cas.

Les équations différentielles fournissent un outil important pour l'étude des systèmes complexes et leurs trajectoires dans le temps. Elles permettent d'étudier en particulier la sensibilité aux conditions initiales, ainsi que les conditions d'équilibre. Dans le but de simplifier l'étude de la dualité entre l'approche agrégative et l'approche microscopique de la diffusion de la panique dans une foule, nous proposons d'étudier la phase de contagion du modèle de propagation de la panique en l'absence de mobilité développée dans le chapitre 7.4. Nous mettons ainsi en équation cette phase sous forme d'équations différentielles ordinaires.

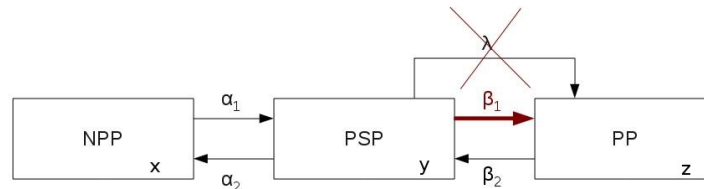


FIGURE 8.1: Modèle compartimental de propagation de la panique uniquement par contact infectieux entre les individus du compartiment PSP et ceux du compartiment PP. La probabilité de transition λ est nulle.

Nous rappelons que le modèle est constitué de trois compartiments où les individus sont classés selon leur état émotionnel (figure 8.1) :

- PSP : compartiment des personnes susceptibles de paniquer. Le nombre d'individus de ce compartiment est noté x .
- NPP : compartiment des personnes non paniquées. Le nombre d'individus de ce compartiment est noté y .

- PP : compartiment des personnes paniquées. Le nombre d'individus de ce compartiment est noté z .

La transition des individus d'un compartiment à un autre est réalisée selon des taux de transition dont nous rappelons les principes :

- β_1 : taux de contact infectieux. La probabilité qu'un individu du compartiment PSP panique au contact d'un individu paniqué. Nous utilisons dans les équations du système dynamique le terme $\frac{\beta_1}{N}$ qui définit une transmission fréquence dépendante [24]. C'est à dire que la force d'infection est proportionnelle à la proportion des paniqués dans la population. En effet, dans le cadre d'une transmission d'une infection par contact entre un individu infecté et un individu sain c'est la transmission fréquence dépendante qui est souvent utilisée.
- α_1 : taux de transition d'un individu non paniqué au compartiment PSP.
- λ : taux de transition d'un individu susceptible de paniquer au compartiment PP.
- β_2 : taux de transition d'un individu paniqué au compartiment PSP.
- α_2 : taux de transition d'un individu susceptible de paniquer au compartiment NPP.

Nous obtenons alors le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} &= -\alpha_1 x + \alpha_2 y \\ \frac{dy}{dt} &= \alpha_1 x - \alpha_2 y + (\beta_2 - \frac{\beta_1}{N} y) z \\ \frac{dz}{dt} &= (\frac{\beta_1}{N} y - \beta_2) z \end{cases} \quad (8.1)$$

Remarque 8.2.1. *Les taux de transition entre le compartiment NPP et PSP varient selon la nature de la perturbation. En effet, dans le cas d'une perturbation négative qui persiste dans le temps, les individus susceptibles de paniquer ne se calment pas, puisque la source de danger est toujours présente. Les PSP transitent alors vers le compartiment PP sous l'effet d'une contagion ou restent simplement dans leur compartiment avec une émotion de peur. Cependant, lorsqu'une perturbation positive se produit et persiste également dans le temps, la peur disparaît progressivement, laissant une place à une émotion positive. Les individus PSP transitent dans ce cas vers le compartiment NPP. Les individus du compartiment NPP quant à eux restent dans leurs compartiment avec une émotion positive qui s'intensifie au cours du temps. Ces différences de comportement se traduisent dans le modèle dynamique par un taux de transition α_1 nul dans le cas d'une perturbation positive et un taux de transition α_2 nul dans le cas d'une transition négative.*

8.3 Étude « théorique » du modèle

Le système dynamique que nous modélisons permet de décrire l'évolution des variables x , y et z au cours du temps, ce qui représentent respectivement les populations NPP, PSP et PP. L'évolution de chacune de ces populations est donnée respectivement par la dérivée de x , de y et de z en fonction du temps, soit les fonctions : $\frac{dx}{dt}$, $\frac{dy}{dt}$ et $\frac{dz}{dt}$. Dans le cas d'un danger de type *incendie* par exemple, une proportion α_1 des individus du compartiment NPP prennent peur, ils seront donc considérés comme PSP. Cette transition se traduit dans le système dynamique par un retrait d'une proportion des individus du compartiment NPP ($x - \alpha_1 x$) et leur ajout au compartiment PSP ($y + \alpha_1 x$). Une proportion d'individu PSP transite à son tour vers le compartiment PP sous l'effet de la contagion, ce qui apparait sous la forme des termes non linéaire $\frac{\beta_1}{N} y z$. Le retour au calme des individus paniqués se traduit par une transition du compartiment PP vers le compartiment PSP. Une proportion d'individus $\beta_2 z$ est ainsi retirées du compartiment PP et ajoutée au compartiment PSP ($y + \beta_2 z$).

8.3.1 Points d'équilibre

La population étudiée est constante le système dynamique est donc un système isolé. Nous avons donc,

$$x + y + z = N \quad (8.2)$$

Ainsi, on a

$$x \leq N, \quad y \leq N, \quad z \leq N$$

Nous nous intéressons dans notre étude aux solutions positives pour x , y et z , nous avons donc,

$$x \geq 0, \quad y \geq 0, \quad z \geq 0 \quad (8.3)$$

La population totale étant constante, tous les individus qui sortent de l'un des compartiments entrent dans un autre. Ce qui se traduit par l'équation suivante :

$$\frac{dx}{dt} + \frac{dy}{dt} + \frac{dz}{dt} = 0 \quad (8.4)$$

L'étude de la dynamique de propagation revient à déterminer les points d'équilibre (système 8.1) en résolvant les équations du système.

Puisque nous avons la relation $x + y + z = N$ alors nous pouvons écrire $x = N - y - z$. Les équations différentielles sont ainsi simplifiées en deux équations :

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = \alpha_1(N - y - z) - \alpha_2 y + (\beta_2 - \frac{\beta_1}{N} y) z \\ \frac{dz}{dt} = (\frac{\beta_1}{N} y - \beta_2) z \end{cases} \quad (8.5)$$

Chercher les points d'équilibre du système revient à chercher les valeurs de y et de z pour lesquels la variation est nulle. Ce qui revient à résoudre les équations $\frac{dy}{dt}$ et $\frac{dz}{dt}$ pour $\frac{dy}{dt} = 0$ et $\frac{dz}{dt} = 0$. La résolution des équations nous permet d'obtenir deux points d'équilibre :

1. le premier point d'équilibre à $\bar{y} = N$ et $\bar{z} = 0$, soit $(N, 0)$: point d'équilibre pour une population saine sans la panique (PSP) « disease-free equilibrium ».
2. le deuxième point d'équilibre à $\bar{y} = \frac{\beta_2}{\beta_1}$ et $\bar{z} = \frac{\beta_2}{\beta_1}(\frac{-\alpha_2}{\alpha_1} - 1) + N$: point d'équilibre endémique « endemic equilibrium » où la population est constituée par une proportion saine et une proportion paniquée (PP).

8.3.2 Propriétés à l'équilibre

Le théorème du seuil

La modélisation agrégative de la propagation de la panique nous permet de répondre à une question importante, celle de savoir si la panique revêt un caractère épidémique ou pas. Nous pouvons répondre à cette question en étudiant le système d'équations différentielles (système 8.1). En effet, une épidémie implique que le nombre des individus du compartiment PP augmente au cours du temps, ce qui peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\beta_1}{N}yz > \beta_2z$$

Ce qui donne :

$$\frac{\beta_1}{N\beta_2}y > 1 \tag{8.6}$$

Le ratio $\frac{\beta_1}{N\beta_2}y$ définit le nombre de reproduction R connu sous le nom du théorème du seuil. Selon R une épidémie aura lieu dans le cas où sa valeur est supérieure à 1. Ce paramètre constitue un résultat fondamental en épidémiologie [4, 65]. Le paramètre R peut être considéré comme un outil de prévision et de gestion des phénomènes de panique, et constituer donc un apport considérable pour les décideurs en terme de gestion des conséquences des catastrophes sur la population.

Le nombre de reproduction de base R_0

L'équation 8.6 indique que la diffusion de la panique dépend du nombre d'individus susceptibles de paniquer (PSP). Ce nombre n'est cependant pas très informatif, c'est généralement sa valeur initiale R_0 qui est la plus utilisée. Cette valeur correspond au nombre d'infection secondaire qui peuvent apparaître suite à l'introduction

8. Approche agrégative de modélisation des phénomènes de panique dans une foule

d'un individu infecté dans la population entièrement constituée d'individus susceptibles de paniquer. L'expression de R_0 se déduit de celle de R en remplaçant le nombre des individus susceptibles de paniquer y par la taille de la population totale N :

$$R_0 = \frac{\beta_1}{\beta_2} \quad (8.7)$$

Ce qui donne :

$R_0 = \frac{\beta_1}{\beta_2} > 1$: propagation de la panique.

$R_0 = \frac{\beta_1}{\beta_2} < 1$: absence de propagation de la panique.

L'expression de R_0 montre que la propagation de la panique dans la population dépend du taux de contact infectieux β_1 . Comme β_1 dépend des propriétés intrinsèques de la population et de la nature du stimulus déclenché, R_0 n'est donc pas une caractéristique d'un stimulus particulier mais d'un stimulus donné dans une population donnée. Ainsi, un même stimulus peut engendrer une épidémie de panique dans une population et une absence totale de la panique dans une autre.

8.4 Études numériques du modèle

L'étude numérique d'un système d'équation différentielle peut renseigner sur plusieurs direction de recherche. Nous orientons notre travail dans un premier temps sur l'observation des séries temporelles qui donnent l'évolution des variables du système au cours du temps. Ensuite, nous nous concentrons sur l'étude de l'évolution de ces variables les unes par rapport aux autres. De nombreux procédés existent pour résoudre un système d'équation différentielle, nous utilisons une approximation d'Euler [6] qui permet d'obtenir une approximation des solutions, et ce en discrétisant l'intervalle d'étude en un certain nombre de pas de temps. L'approximation d'Euler nous permet d'écrire le système suivant :

$$\begin{cases} x_{t+1} = x_t - \alpha_1 x_t + \alpha_2 y_t \\ y_{t+1} = y_t + \alpha_1 x_t - \alpha_2 y_t + (\beta_2 - \frac{\beta_1}{N} y_t) z_t \\ z_{t+1} = z_t + (\frac{\beta_1}{N} y_t - \beta_2) z_t \end{cases} \quad (8.8)$$

Nous implémentons cette écriture du système dynamique sous l'environnement de modélisation NetLogo [87]. Ce qui nous assure une manipulation simple et rapide des conditions initiales et des paramètres de transition. Nous proposons d'illustrer l'hypothèse de propagation de la panique dans une population en étudiant l'évolution temporelle des nombres des individus paniqués pour une valeur de $R_0 < 1$ et

une valeur de $R_0 > 1$. Nous observons pour cela un scénario où l'environnement est perturbé par un stimulus émotionnellement négatif « incendie ». Nous partons d'une population composée de 50 individus non paniqués, 70 individus susceptibles de paniquer et 5 individus paniqués. Nous faisons varier la valeur des taux de transitions β_1 et β_2 afin de vérifier la validité de l'expression du nombre de production de base. La figure 8.3 nous montre en effet une croissance du nombre d'individus paniqués pour $R_0 = 1.66$ jusqu'à la stabilisation du nombre d'individus paniqués à 50 individus et celui des individus susceptibles de paniquer à 75 individus. La figure 8.4 montre en revanche une extinction de la panique pour $R_0 = 0.6$, avec une disparition des individus paniqués et une croissance du nombre d'individus susceptibles de paniquer.

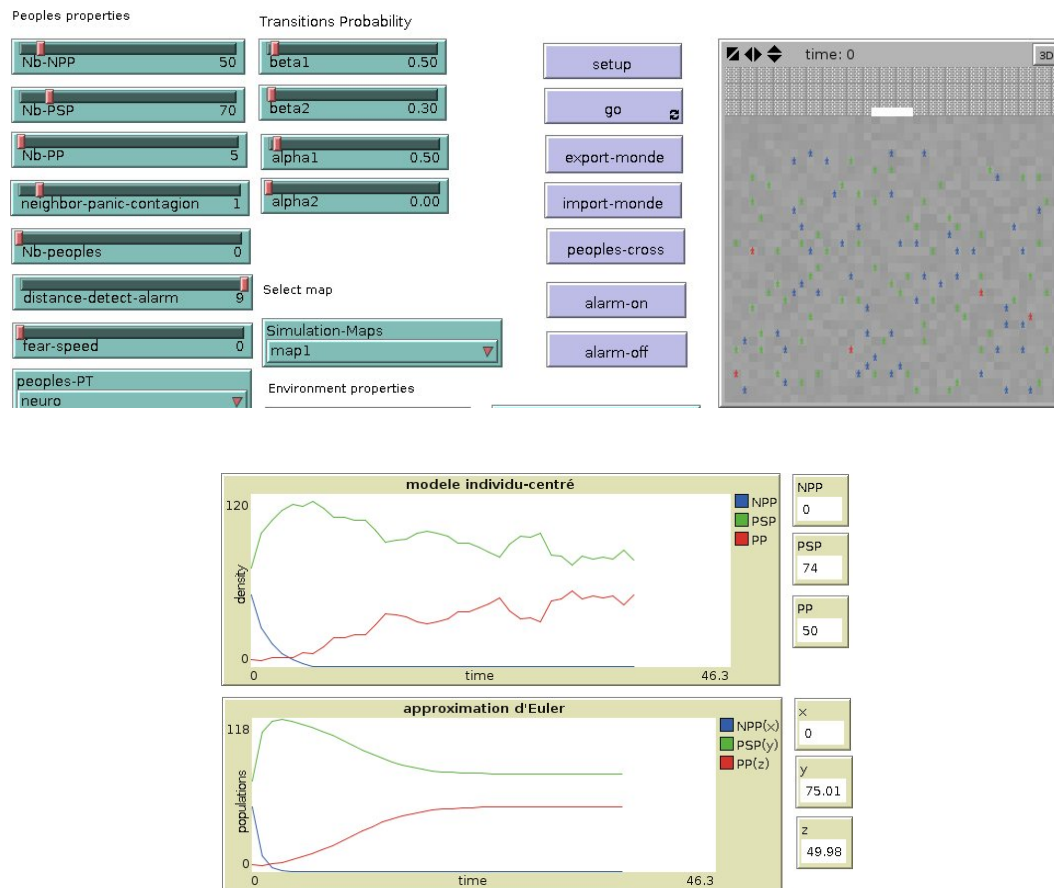


FIGURE 8.2: Capture écran de l'implémentation du système dynamique sous Netlogo [87].

Les résultats montrent que la panique se diffuse tant que le taux de contact infec-

8. Approche agrégative de modélisation des phénomènes de panique dans une foule

tieux β_1 est supérieur au taux de retour à l'état calme β_2 . Ce résultat confirme l'expression du nombre de production de base (équation 8.7). Les résultats du système dynamique coïncide avec les conclusions retenus dans l'approche individu centrée du chapitre 7.4.2. En effet, la gestion des paramètres qui permettent de réduire la probabilité de diffusion de la panique (β_1) et la durée de l'état de panique d'un individu (β_2) permet de bloquer la propagation de ce fléau et ainsi protéger la population des effets dévastateurs d'une panique générale. Il est donc possible de contrôler la panique et de réduire ses risques sur la population. Cette maîtrise passe par exemple par :

- Une disponibilité des informations sur les risques réels encourus pour chaque danger susceptible de se produire. Ce qui contribue à la réduction du mimétisme et par conséquent le taux de contact infectieux β_1 .
- Une architecture qui réduit le taux de contact entre les individus et empêche l'apparition des phénomènes émergents comme la formation d'arche au niveau de la sortie.

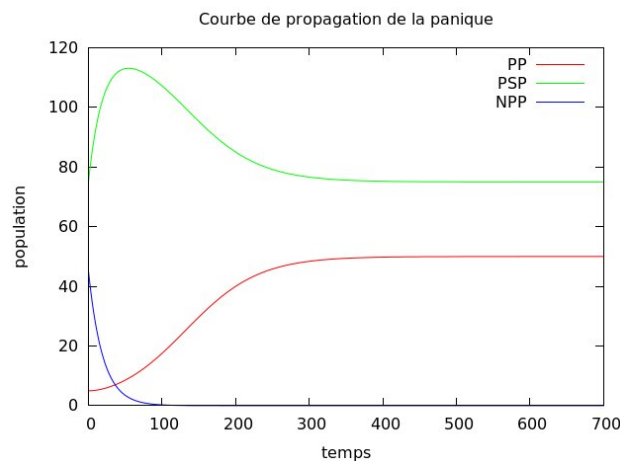


FIGURE 8.3: Courbes indiquant le nombre d'individus NPP, PSP et PP pour un nombre de reproduction de base $R_0 = 1.66 > 1$. La population est composée de 50 individus non paniqués, 70 individus susceptibles de paniquer et 5 individus paniqués. La population est exposée à un stimulus négatif « incendie ». Les taux de transition sont : $\beta_1 = 0.5$, $\beta_2 = 0.3$ et $\alpha_1 = 0.5$. Nous considérons que pour une perturbation négative le taux $\alpha_2 = 0$. Nous observons une croissance du nombre d'individus PP jusqu'à l'équilibre à $t = 588$ pour un nombre d'individu PP égale à 75, un nombre d'individu PSP égale à 50 et une extinction de la population NPP.

8.5. Complémentarité entre l'approche agrégative et l'approche individu-centrée

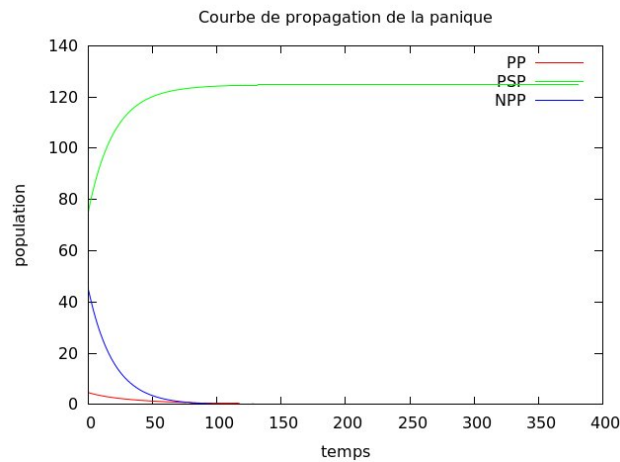


FIGURE 8.4: Courbes indiquant le nombre d'individus NPP, PSP et PP pour un nombre de reproduction de base $R_0 = 0.6 < 1$. La population est équivalente à celle de la figure 8.3. Les taux de transition sont : $\beta_1 = 0.5$, $\beta_2 = 0.3$ et $\alpha_1 = 0.5$. Nous considérons que pour une perturbation négative le taux $\alpha_2 = 0$. Nous observons une extinction de la panique. Le système atteint un état stable pour une population PSP égale à 125.

8.5 Complémentarité entre l'approche agrégative et l'approche individu-centrée

L'approche agrégative est une approche descriptive qui a pour but de représenter la trajectoire du système par la dynamique des variables qui le décrivent. Notre modèle « système dynamique » décrit en effet l'évolution de populations d'individus ayant des caractéristiques particulières et non l'évolution des individus eux-mêmes. Cette étude ne nécessite donc pas une étude explicite sur les entités du système pour suivre leurs évolutions générales. Elle agrège l'ensemble d'individus en interaction et fournit le résultat émergent de la dynamique globale. Néanmoins, les comportements de rétroaction réflexives sont une raison de la non-linéarité de notre système complexe social. Le caractère imprédictible de l'individu peut modifier totalement le comportement global de la foule. C'est pour cela qu'une étude basée sur les entités du système est nécessaire afin de permettre la prise en compte des propriétés de chaque individu dans le comportement collectif résultant et aussi l'étude de la trajectoire d'un seul individu ou d'une foule entière.

L'étude conjointe de la propagation de la panique avec une formalisation agrégative et individu-centré nous permet de profiter des outils que fournissent chacune

8. Approche agrégative de modélisation des phénomènes de panique dans une foule

des deux approches pour pouvoir étudier au mieux le système. Nous pouvons par conséquent présenter une analyse de la propagation de la panique dans une foule selon différents angles d'étude :

- Approche agrégative : une étude de la sensibilité aux conditions initiales et les conditions d'équilibre.
- Approche individu-centrée : une étude des comportements émergents du système issus des interactions entre les individus.

8.5.1 Description du modèle individu-centré

Nous procédons dans cette section à une analyse des deux niveaux d'abstraction conjointement et nous étudions les paramètres qui peuvent être rapprochés d'un modèle à l'autre. Afin de mieux approcher le modèle individu-centré au modèle dynamique, nous tenons compte d'un seul critère d'hétérogénéité entre les individus, qui est la classe épidémiologique à laquelle appartient l'individu. Nous considérons également que chaque individu admet une vision global de son environnement et donc en contact avec tous les individus du modèle. Dans cette première approche d'étude nous étudions le cas d'une population statique et donc chaque individu admet une vitesse de déplacement nulle ($V = 0$).

Le modèle individu-centré que nous étudions dans cette partie est équivalent au modèle développé dans le chapitre 4. Les individus admettent la même architecture cognitive et le même modèle de propagation de la panique. Seule les règles de transitions d'un individu d'un compartiment à un autre changent, elle ne sont plus basées sur les émotions mais sur des probabilité de transition. Chaque individu admet une probabilité a_1 pour le passage du compartiment NPP vers le compartiment PSP, une probabilité a_2 pour le passage du compartiment PSP au compartiment NPP, une probabilité b_1 de contracter la panique au contact d'un paniquer et une probabilité b_2 pour la transition du compartiment PP au compartiment PSP.

Nous pouvons assimiler le paramètre a_1 à α_1 (taux de transition du compartiment NPP au compartiment PSP), le paramètre a_2 à α_2 (taux de transition du compartiment PSP au compartiment NPP), le paramètre b_2 à β_2 (taux de transition du compartiment PP au compartiment PSP). Dans le système dynamique (équation 8.1) le nombre d'individus susceptibles de paniquer contaminés par un paniqué par unité de temps est $\frac{\beta_1}{N}y$. Il est, dans le modèle individu centré, égale à $b_1 * V_{psp}$, où V_{psp} est le nombre de PSP au voisinage d'un PP. Cependant les individus paniqués du modèle individu centré ont un nombre de voisins PSP différent. Pour cela nous calculons un nombre moyen de contact en s'inspirant des études sur les réseaux complexes de Vespigniani *et al* [10] que nous avons d'ailleurs utilisé dans le chapitre 6.2.2. Nous rappelons ci-dessous le calcul du nombre de contact moyen $\langle k \rangle$:

8.5. Complémentarité entre l'approche agrégative et l'approche individu-centrée

Soit,

$$P(k) = N_k/N \quad (8.9)$$

où N_k est le nombre d'individu ayant k voisins et N le nombre d'individus dans la foule. La valeur moyenne de contact par individu est donnée par :

$$\langle k \rangle = \sum_k kP(k) \quad (8.10)$$

V_{psp} est le nombre de voisin d'un PP, nous pouvons écrire alors

$$V_{psp} = \langle k \rangle \frac{y}{N} \quad (8.11)$$

avec $\frac{y}{N}$ la probabilité que les voisins de l'individu paniqué soit des PSP. Le nombre de PSP contaminé au contact d'un PP peut s'écrire alors :

$$\frac{\beta_1}{N}y = b_1 \frac{\langle k \rangle}{N}y$$

ce qui donne

$$\beta_1 = b_1 \langle k \rangle \quad (8.12)$$

La probabilité de contamination b_1 d'un PP du modèle individu-centré peut être assimilé donc à $\frac{\beta_1}{\langle k \rangle}$.

8.5.2 Simulations et résultats

Nous implémentons le modèle individu-centré que nous venons de développer en utilisant la plate-forme NetLogo. Le programme nous permet de tracer l'évolution du nombre d'individus dans chaque compartiment en fonction du temps. Nous procédons dans cette partie à une étude comparative des courbes obtenus dans les deux modèles et nous analysons par la suite l'impact de la nature des interactions sur la propagation de la panique.

Nous effectuons ces études sur une populations composée de 50 individus NPP, 70 individus PSP et 5 individus PP. Chaque individu admet sa propre probabilité de transition suivant le compartiment auquel il appartient. Par contre tous les individus paniqués partagent la même probabilité de contamination $b_1 = 0.004$, puisque la valeur de b_1 est déterminée à partir du taux de contact moyen $\langle k \rangle$. Nous proposons deux scénarios d'études, dans le premier scénario les interactions entre les individus sont globales. Chaque individu admet une distance de vision de 25 m , d'où une valeur de contact moyen $\langle k \rangle = 124$. Dans le deuxième scénario les interactions sont plutôt locales, chaque individu admet une distance de vision de

8. Approche agrégative de modélisation des phénomènes de panique dans une foule

7.5 m, d'où une valeur moyenne de contact $\langle k \rangle = 2.3$.

La figure 8.5 représente une moyenne de 50 simulations de l'évolution temporelle du nombre d'individus dans chaque compartiment du modèle individu-centré. Nous observons une similitude entre cette courbe et celle du modèle agrégatif (figure 8.6). La panique se diffuse dans la population hôte du modèle individu-centré jusqu'à atteindre l'équilibre à $t = 30$. Cet état d'équilibre est atteint en revanche à $t = 20$ dans le modèle agrégatif. Ce décalage est causé lors du calcul des équations différentielles ordinaires selon l'approximation d'Euler. C'est pour cela, nous nous intéressons à l'allure des deux courbes, qui sont d'ailleurs très proches.

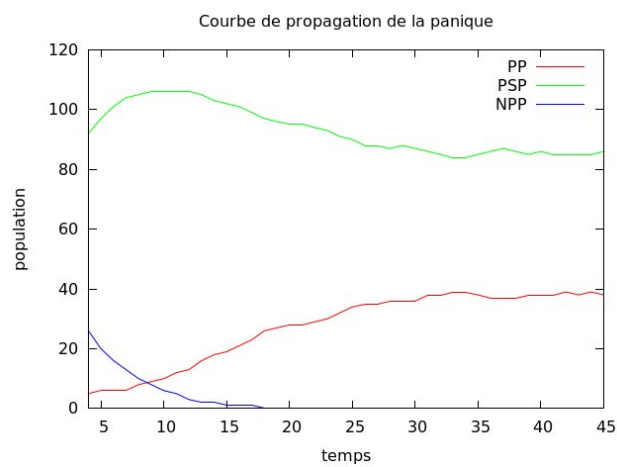


FIGURE 8.5: Courbes indiquant le nombre d'individus NPP, PSP et PP associée à l'implémentation individu-centré sous NetLogo. Cas où la distance de vision des individus est égale à 25 m. La probabilité de transmission de la panique d'un individu paniqué à ses voisins susceptibles de paniquer est $b_1 = 0.004$. Les taux de transitions a_1 , a_2 et b_2 sont des taux fixes déterminés aléatoirement pour chaque individu.

8.5. Complémentarité entre l'approche agrégative et l'approche individu-centrée

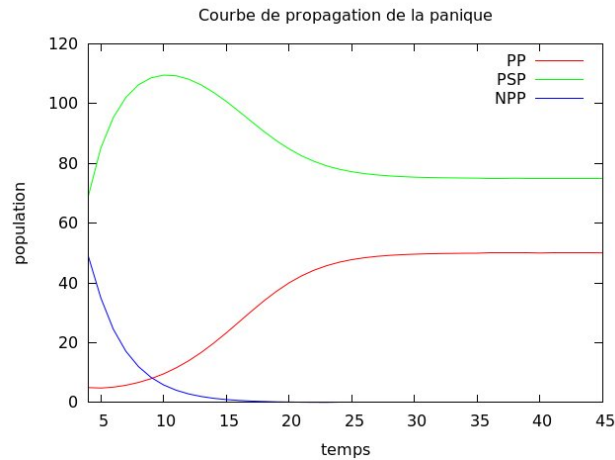


FIGURE 8.6: Courbes indiquant le nombre d'individus NPP, PSP et PP associée à l'implémentation de l'approximation d'Euler du modèle agrégatif sous NetLogo. Le taux de contact infectieux $\beta_1 = 0.5$ et le nombre de reproduction de base $R_0 = 1.66$. Les paramètres de transitions sont : $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0$ et $\beta_2 = 0.3$.

La figure 8.7 représente une moyenne de 50 simulations de l'évolution temporelle du nombre d'individus du modèle individu-centré pour le deuxième scénario. Nous observons une grandes différences entre cette courbe et celle de la figure 8.6. En effet, dans le cas d'interactions locales le taux de contact entre les individus est très faible (*i.e* $\langle k \rangle = 2.3$), ce qui réduit considérablement le taux de diffusion de la panique dans la foule. En revanche, dans le cas d'une interaction globale les individus paniqués sont susceptibles de contaminer un plus large nombre d'individus du compartiment PSP. Nous constatons donc l'impact du réseaux d'interactions sur la dynamique de propagation de la panique dans un modèle spatialisé. Ce résultat confirme l'influence du réseaux de contact sur la diffusion de la panique, ce que nous avons démontré dans le chapitre 7.4.1. La correspondance des résultats entre les deux approches de modélisations nous permet d'envisager une possibilité de rapprochement entre les paramètres de transition du modèle agrégatif de propagation de la panique et des taux de transition du modèle cognitif.

8. Approche agrégative de modélisation des phénomènes de panique dans une foule

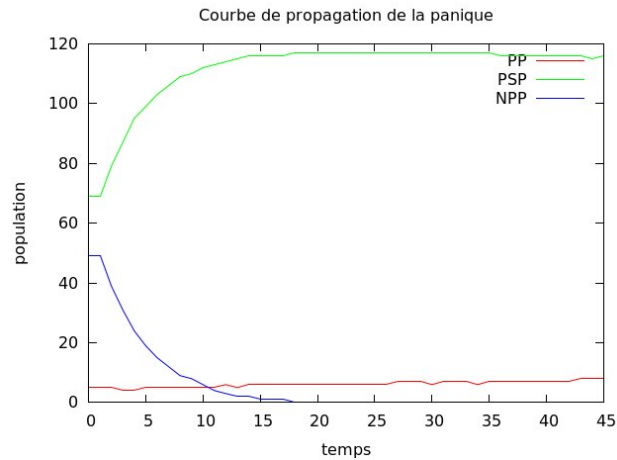


FIGURE 8.7: Courbes indiquant le nombre d'individus NPP, PSP et PP associée à l'implémentation individu-centré sous NetLogo. Cas où la distance de vision des individus est égale à $7.5 m$. La probabilité de transmission de la panique d'un individu paniqué à ses voisins susceptibles de paniquer est $b_1 = 0.004$. Les taux de transitions a_1 , a_2 et b_2 sont des taux fixes déterminés aléatoirement pour chaque individu.

8.6 Synthèse du chapitre

Le but de ce chapitre est la confrontation des résultats obtenus dans le modèle cognitif de propagation de la panique avec ceux obtenus dans le modèle mathématique. Pour y parvenir nous avons développé dans un premier temps un modèle individu-centré basé sur des probabilités de transition et non sur la dynamique émotionnelle. Nous sommes parvenus à comparer les résultats entre les deux modèles en se basant sur deux scénarios de simulations. Les deux modèles ne s'opposent cependant pas, ils sont aux contraires complémentaires. Nous avons pu associer le taux d'infection β_1 à la probabilité de transmission de la panique d'un individu paniqué à un individu susceptible de paniquer (équation 8.12). Ce rapprochement nous permet d'envisager une possibilité de rapprochement entre les taux de transitions des deux approches d'étude. Ce qui permet un enrichissement mutuel entre les deux modèles en ayant recours l'un à l'autre.

Cette double approche de travail permet de renforcer la complémentarité entre le modèle individu-centré et le modèle système dynamique. Elle nous permet d'utiliser simultanément un formalisme mathématique fort s'appuyant sur une rigueur dans l'expression et un formalisme informatique admettant un haut niveau de description ainsi qu'un important niveau de flexibilité.

Conclusion et perspectives

Conclusion

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à la modélisation des phénomènes de panique dans le cadre d'évacuations, à travers une approche intégrant les propriétés cognitives, émotionnelles et physiques des individus et une modélisation épidémiologique de la panique. Ce travail nous a permis de définir sur plusieurs niveaux d'abstraction le comportement de l'individu en situation de danger et les conséquences de ce dernier sur le comportement global de la foule. Dans son principe notre approche de modélisation vise à couvrir la dimension cognitive et la dimension physique de l'individu afin de produire des comportements réalistes et hétérogènes comparables aux comportements humains.

Le modèle développé met l'accent sur l'importance de la dimension cognitive et émotionnelle dans les déplacements des populations et leurs influences sur les comportements. C'est une approche de modélisation originale qui vient compléter l'ensemble des techniques et modèles déjà proposés dans le domaine de la modélisation des mouvements de foule dans diverses situations. Elle fournit une plate-forme de test permettant la simulation des flux de mouvements d'individus hétérogènes de façon autonome et réaliste. Notre modèle est composé de deux sous modèles :

- Un modèle de mobilité basé sur les propriétés cognitives humaines ;
- Un modèle de panique intégrant le processus de déclenchement et de propagation de la panique.

Sur ce dernier élément nous avons présenté une approche agrégative qui vient présenter le même système à un niveau de granularité différent. Cette approche propose une étude macroscopique des phénomènes de propagation de la panique, elle permet en effet d'étudier la dynamique de croissance de la population des individus paniqués. Cette approche de travail sur deux niveaux d'abstraction (*i.e* microscopique pour l'approche individu centrée et macroscopique pour l'approche agrégative) nous a permis de faciliter l'intégration des propriétés cognitives, émotionnelles et physiques dans l'étude des mouvements de population d'une part et la possibilité d'avoir une vision globale sur la dynamique de croissance de la popula-

8. Approche agrégative de modélisation des phénomènes de panique dans une foule

tion en présence de la panique d'une autre part. Notre démarche de travail renforce la complémentarité entre les modèles microscopiques et les modèles macroscopiques pour l'étude des phénomènes concrets sur diverses échelles ou de description.

Les résultats de notre travail montrent l'influence de la mobilité sur la propagation de la panique et réciproquement, et par conséquent l'importance de la prise en compte des interactions locales sur le comportement global de la population. Nous avons pu tester plusieurs scénarios en présence et en absence de la mobilité. Nous avons validé ce travail avec la confrontation des résultats obtenus à ceux des modèles déjà présents dans la littérature. Nous avons également pu confronter le niveau microscopique et le niveau macroscopique, en comparant les résultats obtenus dans chacune des deux approches de modélisation. Nous sommes parvenus à confirmer leurs complémentarités et la possibilité d'enrichissement entre les deux modèles.

Perspectives

Cette approche de travail ouvre de nombreuses pistes. Il serait intéressant dans un premier temps d'approfondir l'étude de la propagation de la panique avec les deux niveaux d'abstraction. Fournir un moyen de couplage entre les deux modèles permettra d'une part d'étudier l'influence des propriétés de l'individu sur la dynamique de propagation de la panique. D'autre part, de pouvoir faire varier les taux de croissance et de décroissance des émotions selon les taux de transition entre les différents compartiments du modèle dynamique de panique. Cette possibilité de définir les paramètres d'un modèle par rapport aux paramètres de l'autre renforcera la complémentarité entre l'approche macroscopique et l'approche microscopique et permettrait d'enrichir ce dernier en profitant de l'apport de chacune des deux approches. D'autres possibilités sont ouvertes sur l'amélioration du modèle, en particulier, le modèle dynamique. En effet, il serait intéressant de modéliser la propagation de la panique en intégrant la mobilité. Nous ferons appel dans ce cas aux modèles spatialisés de dynamique des populations, en particulier les équations aux dérivées partielles (EDP), puis nous confronterons les résultats que nous obtiendrons avec les résultats déjà obtenus avec le modèle individu-centré.

Nous pouvons également envisager certaines améliorations du modèle individu-centré afin que notre modèle puisse être considéré comme un outil d'aide à la décision dans des situations de crises. Toute en gardant une représentation parcimonieuse de la diffusion de la panique. Parmi ces améliorations qui pourraient être intégrées à notre modèle actuel :

- Intégrer un environnement réel à l'aide de carte géographique (Système d'information géographique SIG) ou des plans d'édifices ;

- Étendre les capacités cognitives des individus et ce en développant sa mémoire et en élargissant ses choix des actions qu'il peut entreprendre ;
- Intégrer un modèle de relations sociales ce qui permet la prise en compte de l'influence de ces derniers sur les comportements émergent.

La proximité du problème de propagation de la panique nous laisse penser qu'il serait intéressant d'approfondir l'influence de la structure du réseau d'interaction, ce réseau pouvant être en constante évolution du fait de la mobilité des individus. Les interactions sociales influencent également sans aucun doute la topologie du graphe et son évolution dans le temps. Nous pensons aux membres d'une famille par exemple qui forment un graphe ou un cluster relativement stable dans le temps.

Notre travail prend sa place dans le projet « protection des populations » du Grand Réseau de Recherche : Maitrise des Risques Techniques de la région Haute-Normandie. Ce dernier développe des activités de recherche pluridisciplinaire autour de la sécurité globale qui se définit comme « la capacité d'assurer à une collectivité et à ses membres, un niveau suffisant de prévention et de protection contre les risques et les menaces de toutes natures et de tous impacts, sans rupture de la vie et des activités collectives individuelles »¹. Le réseau MRT, décline donc cet objectif global en trois axes :

1. La prévention ;
2. La gestion de crises ;
3. La résilience et la remédiation.

Ces actions sont indissociables et vues de façon complémentaire. La formalisation du risque à partir de trois concepts le facteur de risque (péril, danger, ...), la criticité, la vulnérabilité offre quant à elle une vision transversale des travaux de recherche menés dans le cadre du réseau. La démarche scientifique associe des approches méthodologiques et conceptuelles issues des sciences pour l'ingénieur, les sciences de l'information et de la communication avec des contributions essentielles des sciences humaines et sociales.

Le projet protection des populations apporte sa contribution à chacun des trois axes, il est de fait positionné principalement au niveau de la gestion de crise. Il est structuré autour de trois thèmes : la modélisation des flux, la culture du risque et la formation des acteurs. Notre travail a trouvé tout naturellement sa place dans le premier thème qui s'intéresse en particulier aux flux de population aussi bien à grande échelle comme l'évacuation d'un quartier ou même d'une ville qu'à plus petite échelle comme l'évacuation d'un grand édifice par exemple un immeuble accueillant du public ou encore un stade. Cette thèse devrait trouver des prolongements dans le futur en étant couplé avec des travaux plus spécifiques sur l'évacuation

1. Institut National des Hautes Études en Sécurité - INHES, 2003

8. *Approche agrégative de modélisation des phénomènes de panique dans une foule*

des bâtiments et ceux également développés sur la mobilité urbaine et l'étude de la morphodynamique des réseaux viaires.

Bibliographie

- [1] R. P. ABELSON. “Whatever Became of Consistency Theory?” In : *Personality and Social Psychology Bulletin* 9.1 (1983), p. 37–54. ISSN : 01461672. DOI : [10.1177/0146167283091006](https://doi.org/10.1177/0146167283091006).
- [2] E. ALTSHULER et al. “Symmetry breaking in escaping ants.” In : *The American naturalist* 166.6 (2005), p. 643–649.
- [3] P. A. ANDERSON. “Decision Making by Objection and the Cuban Missile Crisis Decision Making by Objection and the Cuban Missile Crisis”. In : *Administrative Science Quarterly* 28.2 (1983), p. 201–222. ISSN : 00018392. DOI : [10.2307/2392618](https://doi.org/10.2307/2392618).
- [4] R. ANDERSON et R. MAY. *Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control*. Oxford Science Publications. OUP Oxford, 1992. ISBN : 9780198540403.
- [5] M. ARNOLD. *Emotion and Personality: Psychological aspects*. Emotion and Personality. Columbia University Press, 1960.
- [6] P. AUGER, C. LETT et J.-C. POGGIALE. *Modélisation mathématique en écologie*. Dunod, Paris, 2010.
- [7] S. BANDINI, S. MANZONI et C. SIMONE. “Supporting the application of Situated Cellular Agent in non-uniform spaces”. In : *Future Generation Computer Systems* 21 (2005), p. 627–631.
- [8] S. BANDINI, S. MANZONI et G. VIZZARI. “Crowd modeling and simulation: The role of multi-agent simulation in design support systems”. In : *Artificial Intelligence* (2006), p. 105–120.
- [9] S. BANDINI et al. “Pedestrian and crowd dynamics simulation: Testing SCA on paradigmatic cases of emerging coordination in negative interaction conditions”. In : *Parallel computing technologies*. T. 4671. Springer Berlin / Heidelberg, 2007, p. 360–369.
- [10] A. BARRAT, M. BARTHÉLEMY et A. VESPIGNANI. *Dynamical Process on Complex Networks*. Sous la dir. de C. U. PRESS. Cambridge University Press, First published 2008, reprinted with corrections 2010.

Bibliographie

- [11] A. E. BERLONGHI. “Understanding and planning for different spectator crowds”. In : *Safety Science* 18.4 (1995). Sous la dir. de R. A. SMITH et J. W. DICKIE, p. 239–247. ISSN : 09257535. DOI : [10.1016/0925-7535\(94\)00033-Y](https://doi.org/10.1016/0925-7535(94)00033-Y).
- [12] W. BLEWITT et A. AYESH. “Implementation of millensons model of emotions in a game environment”. In : *Proceedings of the AISB’s 2009 Symposium: AI & Games, Edinburgh, UK*.
- [13] W. BLEWITT et al. “A Milleson-Based Approach to Emotion Modelling”. In : *Conference on Human System Interaction (HSI’08)*. Poland, 2008, p. 491–496.
- [14] V. J. BLUE et J. L. ADLER. “Cellular automata model of emergent collective bi-directional pedestrian dynamics”. In : *Artificial Life VII Proceedings of the Seventh International Conference on Artificial Life*. T. 7. The MIT Press, 2000, p. 437–445.
- [15] V. J. BLUE et J. L. ADLER. “Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways”. In : *Transportation Research Part B: Methodological* 35.3 (2001), p. 293–312. ISSN : 0191-2615. DOI : [DOI : 10.1016/S0191-2615\(99\)00052-1](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(99)00052-1).
- [16] E. BONABEAU. “Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems.” In : *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99 Suppl 3.Suppl 3 (2002), p. 7280–7287.
- [17] G. E. BRADLEY. “A proposed mathematical model for computer prediction of crowd movements and their associated risks”. In : *Engineering for crowd safety*. Sous la dir. de R. SMITH et J. DICKIE. Amsterdam: Elsevier, 1993, p. 3003–11.
- [18] R. BRONNER. “Decision-Making in Complex Situations - Results of German Empirical Studies”. In : *Management International Review of personality and social psychology Emotions relationships and health* 33, No 1 (1993).
- [19] C. BURSTEDDE et al. “Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton”. In : *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 295.3–4 (2001), p. 507–525. ISSN : 0378-4371. DOI : [10.1016/S0378-4371\(01\)00141-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(01)00141-8).
- [21] E. E. CARTER. “The Behavioral Theory of the Firm and Top-Level Corporate Decisions”. In : *Administrative Science Quarterly* 16.4 (1971), p. 413–429. ISSN : 00018392. DOI : [10.2307/2391762](https://doi.org/10.2307/2391762).
- [22] S. CHARDONNEL et al. “Patrons de mobilité : Proposition de définition, de méthode de représentation et d’interrogation.” In : *Les actes de la conférence CASSINI-SIGMA, Géomatique et Analyse Spatiale*. 2004.

- [23] T. J. CHERMACK. “Mental Models in Decision Making and Implications for Human Resource Development”. In : *Advances in Developing Human Resources* 5.4 (2003), p. 408–422. DOI : [10.1177/1523422303257373](https://doi.org/10.1177/1523422303257373). URL : [s](https://doi.org/10.1177/1523422303257373).
- [24] M. CHOISY. “Écologie de la santé et conservation”. In : De Boeck Université, Bruxelles, Belgique, 2010. Chap. Modélisation mathématique en épidémiologie.
- [25] M. D. COHEN, J. B. MARCH et J. P. OLSEN. “Décisions et Organisations”. In : Éditions d’organisation, Chapitre 7, 1972. Chap. Le modèle du « garbage can » dans les anarchies organisées.
- [26] R. M. COLOMBO et M. D. ROSINI. “Pedestrian flows and nonclassical shocks”. In : *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. 2005, p. 13.
- [27] R. CONNELL. *Collective Behavior in the September 11, 2001 Evacuation of the World Trade Center*. Preliminary paper. Disaster Research Center, University of Delaware, 2001.
- [28] C. CROCQ L et Doutheau. “La psychologie des paniques”. In : *Revue du praticien. Vol 38 numero 11* (1988), p. 684–688.
- [29] L. CROCQ. *Les paniques collectives*. Odile Jacob, 2013.
- [30] L. CROCQ et al. *Psychiatrie de catastrophe*. Encyclopédie Médico-Chirurgicale, Psychiatrie. Elsevier, Paris, 1998.
- [31] A. R. DAMASIO et A. R. D. MARCEL BLANC. *L’erreur de Descartes: La raison des émotions*. Sciences (Ed. O. Jacob). Odile Jacob, 2006. ISBN : 9782738117137.
- [32] Z. DAOLIANG, Y. LIZHONG et L. JIAN. “Exit dynamics of occupant evacuation in an emergency”. In : *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 363.2 (2006), p. 501–511. ISSN : 03784371. DOI : [10.1016/j.physa.2005.08.012](https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.08.012).
- [34] J. DE RIVERA. *A structural theory of the emotions*. T. 10. Psychological Issues Monographs 4. International Universities Press, 1977. ISBN : 9780823661718.
- [35] A. DESREUMAUX, X. LECOCQ et V. WARNIER. *Stratégie*. Sous la dir. de P. EDUCATION. 2^eème. 2009, p. 256.
- [36] T. E. DRABECK et J. S. STEPHENSEN. “When disaster strikes”. In : *Journal of Applied Social Psychology* 1(2) (1971), p. 187–203.
- [37] J. P. DUPUY. *La panique*. Les empêcheurs de penser en rond, 2003.
- [38] C. E. ZSAMBOK et G. KLEIN. *Naturalistic Decision Making*. Expertise: Research and Applications Series. Taylor & Francis Group, 1997, p. 414. ISBN : 9780805818741.

Bibliographie

- [39] K. M. EISENHARDT et M. J. ZBARACKI. “Strategic decision making”. In : *Strategic management journal* 13 (1992), p. 17–37.
- [40] P. EKMAN. “An argument for basic emotions”. In : *Cognition & Emotion* 6.3 (1992), p. 169–200. ISSN : 02699931. DOI : [10.1080/02699939208411068](https://doi.org/10.1080/02699939208411068).
- [41] P. EKMAN. “In Handbook of Cognition and Emotion”. In : *Handbook of Cognition and Emotion*. John Wiley & Sons, Ltd, 2005. Chap. Basic Emotions, p. 45–60. ISBN : 9780470013496. DOI : [10.1002/0470013494.ch3](https://doi.org/10.1002/0470013494.ch3).
- [42] P. EKMAN et W. V. FREISEN. “Facial action coding system: A technique for the measurement of facial movement”. In : *Palo Alto, Calif: Consulting Psychologists Press* (1978).
- [43] J. FERBER. *Les systèmes multi-agent: vers une intelligence collective*. Inter-Editions, 1995, p. 513.
- [44] E. FREDKIN et T. TOFFOLI. “Conservative logic”. In : *International Journal of Theoretical Physics* 21 (3 1982). [10.1007/BF01857727](https://doi.org/10.1007/BF01857727), p. 219–253. ISSN : 0020-7748.
- [45] N. H. FRIJDA. *The emotions*. Sous la dir. de K. DUNLAP. T. 1. November 2003. Cambridge University Press, 1986, p. 564.
- [46] J. P. GABRIEL et P. DE LA HARPE. *Daniel Bernoulli, pionner des modèles mathématiques en médecine*. 2010.
- [47] M. GEORGEFF et al. “The belief-desire-intention model of agency”. In : *Intelligent Agents V: Agents Theories, Architectures, and Languages* (1999), p. 1–10.
- [48] J. J. GIBSON. *The ecological approach to visual perception*. Resources for ecological psychology. Taylor & Francis, 1986. ISBN : 9780898599596.
- [49] L. R. GOLDBERG. “An alternative ”description of Personality”: the Big-Five factor structure.” In : *Journal of personality and social psychology* 59.6 (1990), p. 1216–1229.
- [50] R. L. GOLDSTONE et M. A. JANSSEN. “Computational models of collective behavior.” In : *Trends in Cognitive Sciences* 9.9 (2005), p. 424–430.
- [51] P. P. GRASSÉ. “La reconstruction du nid et les coordinations inter-individuelles chez *bellicositermes natalensis* et *cubitermes s.p.* la théorie de la stigmergie : essai d’interprétation du comportement des termites constructeurs.” In : *Insectes sociaux*, 1959. Chap. 6, p. 41–80.
- [52] V. GRIMM et S. F. RAILSBACK. *Individual-based modeling and ecology*. Sous la dir. de S. E. SIMON A LEVIN. Princeton series in theoretical and computational biology. Princeton University Press, 2005. Chap. 1, p. 428. ISBN : 069109666X.

- [53] E. T. HALL, F. CHOAY et A. PETITA. *La dimension cachée*. Sous la dir. de POINTS. 1978, p. 254.
- [54] D. HELBING, I. FARKAS et T. VICSEK. “Simulating dynamical features of escape panic”. In : *Nature*. 2000, p. 400, 487–490.
- [55] D. HELBING et P. MOLNÁR. “Social force model for pedestrian dynamics”. In : *Phys. Rev. E* 51 (5 mai 1995), p. 4282–4286. DOI : [10.1103/PhysRevE.51.4282](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.4282).
- [56] D. HELBING et al. “Lattice gas simulation of experimentally studied evacuation dynamics”. In : *Phys. Rev. E* 67 (2003), p. 067101.
- [57] D. HELBING et al. “Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations”. In : *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Sous la dir. de M. SCHRECKENBERG et S. D. SHARMA. Berlin : Springer, 2002, p. 21–58.
- [58] L. F. HENDERSON. “On the fluid mechanics of human crowd motion”. In : *Transportation Research* 8.6 (1974), p. 509–515. ISSN : 0041-1647. DOI : [DOI : 10.1016/0041-1647\(74\)90027-6](https://doi.org/10.1016/0041-1647(74)90027-6).
- [59] L. F. HENDERSON. “The statistics of crowd fluids”. In : *Nature* 229 (1971), p. 381.
- [60] P. S. HOUTS et al. “The protective action decision model applied to evacuation during the three mile island crisis”. In : *International Journal of Mass Emergencies and Disasters* 2 (1984), p. 13.
- [61] R. L. HUGHES. “A continuum theory for the flow of pedestrians”. In : *Transportation Research Part B: Methodological* 36.6 (2002), p. 507–535. ISSN : 01912615. DOI : [10.1016/S0191-2615\(01\)00015-7](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(01)00015-7).
- [63] C. ISNARD et C. ZEEMAN. *Some Models from Catastrophe Theory in the Social Sciences*. C.A. Isnard, 1977. URL : <http://books.google.fr/books?id=GphaGwAACAAJ>.
- [64] M. ISOBE, D. HELBING et T. NAGATANI. “Experiment, theory, and simulation of the evacuation of a room without visibility”. In : *Phys. Rev. E* 69 (6 juin 2004), p. 066132. DOI : [10.1103/PhysRevE.69.066132](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.066132).
- [65] M. J. KEELING et P. ROHANI. *Modeling Infectious Diseases in Human and Animals*. Princeton University Press, 2007.
- [66] C. KELLAND. “Panic: How men and women act when facing terror”. In : *American Magazine* 109 (1930), p. 92.
- [67] A. KIRCHNER et al. “Simulation of competitive egress behavior: comparison with aircraft evacuation data”. In : *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 324.3–4 (2003), p. 689–697. ISSN : 0378-4371. DOI : [10.1016/S0378-4371\(03\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(03)00076-1).

Bibliographie

- [68] A. LANGLEY et al. "Opening up Decision Making: The View from the Black Stool". In : *Organization Science* 6.3 (1995), p. 260–279. ISSN : 10477039. DOI : [10.1287/orsc.6.3.260](https://doi.org/10.1287/orsc.6.3.260).
- [69] R. S. LAZARUS. *Emotion and adaptation*. Oxford University Press, Incorporated, 1994. ISBN : 9780195092660.
- [70] G. LE BON. *Psychologie des foules*. 9e édition. T. 3. 1. Paris : Édition Alcan Félix, 1905, 1895, p. 11. DOI : [10.1037/h0064747](https://doi.org/10.1037/h0064747).
- [72] A. R. LINDESMITH, A. STRAUSS et N. K. DENZIN. *Social Psychology*. Eighth. SAGE Publications, Inc, 1999, p. 332.
- [73] S. M. LO et al. "A game theory based exit selection model for evacuation". In : *Fire Safety Journal* 41.5 (2006), p. 364–369. ISSN : 0379-7112. DOI : [10.1016/j.firesaf.2006.02.003](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.02.003).
- [74] O. LUMINET et N. VERMEULEN. "Traité de psychopathologie cognitive". In : sous la dir. d'I. M. V. der LINDEN & G. CESCHI (EDS). In M. Van der Linden & G. Ceschi (Eds), 2004. Chap. Personnalité et psychopathologie cognitive.
- [75] C. M. MACAL et M. J. NORTH. "Tutorial on agent-based modeling and simulation". In : *Proceedings of the 37th conference on Winter simulation, Orlando (USA)*. WSC '05 3. Center for Complex adaptive agent systems simulaions. Winter Simulation Conference, 2005, p. 3–15. ISBN : 1424405017.
- [76] C. M. MACAL et M. J. NORTH. "Tutorial on agent-based modeling and simulation part 2: how to model with agents". In : *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation, Monterey (USA)*. T. 4. WSC '06 3. Center for Complex adaptive agent systems simulaions. Winter Simulation Conference, 2006, p. 73–83. ISBN : 1424405017. DOI : [10.1109/WSC.2006.323040](https://doi.org/10.1109/WSC.2006.323040).
- [77] F. MASAHIRO et N. TAKASHI. "Sidle effect on pedestrian counter flow". In : *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 377.1 (2007), p. 269–278. ISSN : 0378-4371. DOI : [10.1016/j.physa.2006.11.035](https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.11.035).
- [78] R. R. MCCRAE et P. T. COSTA. "Validation of the five-factor model of personality across instruments and observers." In : *Journal of Personality and Social Psychology* 52.1 (1987), p. 81–90.
- [79] R. R. MCCRAE et P. T. C. JR. "Joint factors in self-reports and ratings: Neuroticism, extraversion and openness to experience". In : *Personality and Individual Differences* 4.3 (1983), p. 245–255. ISSN : 0191-8869. DOI : [10.1016/0191-8869\(83\)90146-0](https://doi.org/10.1016/0191-8869(83)90146-0).
- [80] H. MINTZBERG, D. RAISINGHANI et A. THEORET. "The Structure of "Unstructured" Decision Processes". In : *Administrative Science Quarterly* 21.2 (1976), p. 246–275. ISSN : 00018392. DOI : [10.2307/2392045](https://doi.org/10.2307/2392045).

- [81] R. M. MOMBOISSE. *Riots, revolts, and insurrections, by Raymond M. Momboisse*. English. C. C. Thomas Springfield, Ill., 1967, xviii, 523 p.
- [82] H. E. MOORE et al. *Before the wind: A study of response to Hurricane Carla*. National Academy of Sciences-National Research Council in Washington, 1963.
- [83] M. MOUSSAÏD et al. “The Walking Behaviour of Pedestrian Social Groups and Its Impact on Crowd Dynamics”. In : *PLoS ONE* 5.4 (avr. 2010), e10047. DOI : [10.1371/journal.pone.0010047](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010047).
- [84] I. B. MYERS et P. B. MYERS. *Gifts differing: understanding personality type*. Davies-Black Pub., 1980. ISBN : 9780891060741.
- [85] R. NAGAI et al. “Effect of exit configuration on evacuation of a room without visibility”. In : *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 343 (2004), p. 712–724. ISSN : 0378-4371. DOI : [10.1016/j.physa.2004.06.061](https://doi.org/10.1016/j.physa.2004.06.061).
- [86] M. S. EL-NASR, J. YEN et T. R. IOERGER. “FLAME-Fuzzy Logic Adaptive Model of Emotions”. In : *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 3.3 (sept. 2000), p. 219–257. ISSN : 1387-2532. DOI : [10.1023/A:1010030809960](https://doi.org/10.1023/A:1010030809960).
- [88] J. V. NEUMANN. “Theory of Self-Reproducing Automata”. In : *Mathematics of Computation* 21.100 (1966). Sous la dir. d’A. W. BURKS, p. 745.
- [89] A. ORTONY et T. J. TURNER. “What’s basic about basic emotions?” In : *Psychological Review* 97.3 (1990), p. 315–331.
- [90] X. PAN et al. “A multi-agent based Framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations”. In : *AI and Society*. T. 22. 2007, p. 113–32.
- [91] D. O. PARISI et C. O. DORSO. “Microscopic dynamics of pedestrian evacuation”. In : *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 354 (2005), p. 606–618. ISSN : 0378-4371. DOI : [10.1016/j.physa.2005.02.040](https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.02.040).
- [92] N. PELECHANO GOMEZ. “Modeling realistic high density autonomous agent crowd movement: Social forces, communication, roles and psychological influences”. Thèse de doct. Université de Pennsylvanie, 2006.
- [93] R. W. PERRY. “Evacuation decision-making in natural disasters”. In : *Mass Emergencies* 4 (1979), p. 25–38.
- [94] R. PERRY, M. LINDELL et M. GREENE. *Evacuation planning in emergency management*. Battelle Human Affairs Research Centers series. Lexington Books, 1981. ISBN : 9780669046502.
- [95] R. PLUTCHIK. *Emotion. A psychoevolutionary synthesis*. New York : Harper & Row, 1980.

Bibliographie

- [96] D. PROVITOLO. “A new classification of catastrophes based on “Complexity Criteria””. In : *From System Complexity to Emergent Properties*. Sous la dir. de M. AZIZ-ALAOUI et C. BERTELLE. Understanding Complex Systems. Springer Berlin Heidelberg, 2009, p. 179–194. ISBN : 978-3-642-02198-5. DOI : [10.1007/978-3-642-02199-2_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02199-2_8). URL : http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-02199-2_8.
- [97] D. PROVITOLO. “Modélisation et simulation du risque d’inondation en milieu urbain méditerranéen”. In : *in CD Rom des actes des 5ièmes rencontres de THEOQUANT 2001, Besançon* (2003).
- [98] D. PROVITOLO. “Un exemple d’effets de dominos: la panique dans les catastrophes urbaines”. In : *Cybergeo numéro 329* (2005), p. 19.
- [99] E. L. QUARANTELLI. “Panic behavior in fire situations: Finding and a model from the English language”. In : *The Fourth Joint Panel Meeting of the United States-Japan Panel on Fire Research, Disaster Research Center, Tokyo, Japan*. 1979.
- [100] E. L. QUARANTELLI. “Panic behavior: some empirical observations”. In : *American Institute of Architects Conference on Human Response to Tall Building, Chicago, Illinois* (juil. 1975).
- [101] E. L. QUARANTELLI. “Social support systems: Some behavioral patterns in the context of mass evacuation activities”. In : *Disasters and Mental Health: Selected Contemporary Perspectives*. Sowder, Barbara J, 1985, p. 122–136.
- [102] E. L. QUARANTELLI. “Sociology of Panic”. In : *International Encyclopedia of the Social Behavioral Sciences*. Sous la dir. de N. J. SMELSER et P. B. BALTES. International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Pergamon Press, 2001, p. 11532–11535. DOI : [10.1016/B0-08-043076-7/02004-0](https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/02004-0).
- [103] E. L. QUARANTELLI. “The Nature and Conditions of Panic.” In : *American Journal of Sociology* 60.3 (1954), p. 267–275. ISSN : 00029602. DOI : [10.1086/221536](https://doi.org/10.1086/221536).
- [105] C. W. REYNOLDS. “Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model”. In : *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 21.4 (1987). Sous la dir. de M. C. STONE, p. 25–34. ISSN : 00978930. DOI : [10.1145/37402.37406](https://doi.org/10.1145/37402.37406).
- [106] J. K. RIAD et F. H. NORRIS. *Hurricane Threat and Evacuation Intentions: An Analysis of Risk Perception, Preparedness, Social Influences, and Resources*. DRC preliminary paper. University of Delaware. Disaster Research Center, 1998.

- [107] J. K. RIAD, F. H. NORRIS et R. B. RUBACK. “Predicting evacuation in two major disasters: Risk perception, social influence, and access to resources.” In : *Journal of Applied Social Psychology* 29.5 (1999), p. 918–934. ISSN : 00219029. DOI : [10.1111/j.1559-1816.1999.tb00132.x](https://doi.org/10.1111/j.1559-1816.1999.tb00132.x).
- [108] I. J. ROSEMAN. “Cognitive determinants of emotion: A structural theory”. In : *Review of personality and social psychology Emotions relationships and health*. Review of personality and social psychology, Vol 5 5.5 (1984). Sous la dir. de P. R. SHAVER, p. 11–36. ISSN : 02701987.
- [109] J. A. RUSSEL et A. MEHRABIAN. “Distinguishing anger and anxiety in terms of emotional response factors”. In : *Journal of Consulting and Clinical Psychology* Vol42(1) (1974).
- [110] J. A. RUSSELL. “A circumplex model of affect.” In : *Journal of Personality and Social Psychology* 39.6 (1980). Sous la dir. de D. SANDERS et K. SCHERER, p. 1161–1178. ISSN : 00223514. DOI : [10.1037/h0077714](https://doi.org/10.1037/h0077714).
- [111] J. A. RUSSELL et A. MEHRABIAN. “Evidence for a three-factor theory of emotions”. In : *Journal of Research in Personality* 11.3 (1977), p. 273–294. ISSN : 0092-6566. DOI : [10.1016/0092-6566\(77\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0092-6566(77)90037-X).
- [112] C. SALOMA et al. “Self-organized queuing and scale-free behavior in real escape panic.” In : *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100.21 (2003), p. 11947–11952.
- [113] T. C. SCHELLING. “Models of Segregation”. In : *The American Economic Review*. Memorandum 59.2 (1969), p. 488–493. ISSN : 00028282. DOI : [10.1126/science.151.3712.867-a](https://doi.org/10.1126/science.151.3712.867-a).
- [114] K. R. SCHERER. “Criteria for emotion-antecedent appraisal: A review”. In : *Cognitive perspectives on emotion and motivation*. Sous la dir. de V. HAMILTON, G. H. BOWER et N. H. FRIJDA. V. Hamilt. Dordrecht : Kluwer, 1988, p. 89–126.
- [115] K. R. SCHERER. “On the nature and function of emotion: A component process approach.” In : *Approaches To Emotion*. Sous la dir. de K. R. SCHERER et P. EKMAN. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum, 1984. Chap. 14, p. 293–317.
- [116] K. R. SCHERER, A. SCHORR et T. JOHNSTONE. *Appraisal processes in emotion: theory, methods, research*. Sous la dir. de K. R. SCHERER, A. SCHORR et T. JOHNSTONE. T. 48. Series in Affective Science 6. Oxford University Press, 2001. Chap. Appraisal, p. 92–120.
- [117] K. R. SCHERER. “Appraisal Theory. In Handbook of Cognition and Emotion”. In : *Handbook of Cognition and Emotion*. John Wiley & Sons, Ltd, 1999, p. 637–663. ISBN : 9780470013496. DOI : [10.1002/0470013494.ch30](https://doi.org/10.1002/0470013494.ch30).

Bibliographie

- [118] K. R. SCHERER. “Les émotions: fonctions et composantes”. In : *Cahiers De Psychologie Cognitive* 4.1 (1984), p. 9–39. ISSN : 02499185.
- [119] H. A. SIMON. *Administration et processus de décision*. Sous la dir. d'ECONOMIA. 1983, p. 322.
- [120] N. J. SMELSER. *Theory of collective behavior*. International library of sociology and social reconstruction. Routledge & Kegan Paul, 1962.
- [121] C. A. SMITH et P. C. ELLSWORTH. “Patterns of cognitive appraisal in emotion.” In : *Journal of Personality and Social Psychology* 48.4 (1985), p. 813–838.
- [122] C. A. SMITH et R. S. LAZARUS. “Appraisal components, core relational themes, and the emotions”. In : *Cognition & Emotion* 7.3 (1993), p. 233–269.
- [123] R. C. SOLOMON. *The Passions: The Myth and Nature of Human Emotions*. Doubleday, 1984.
- [124] W. SONG et al. “Simulation of evacuation processes using a multi-grid model for pedestrian dynamics”. In : *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 363.2 (2006), p. 492–500. ISSN : 0378-4371. DOI : [10.1016/j.physa.2005.08.036](https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.08.036).
- [125] F. I. STAHL et al. *Time-based Capabilities of Occupants to Escape Fires in Public Buildings: A Review of Code Provisions and Technical Literature*. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1982.
- [126] K. TAKIMOTO et T. NAGATANI. “Spatio-temporal distribution of escape time in evacuation process”. In : *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 320 (15 mar. 2003), p. 611–621.
- [127] R. THOM. *Stabilité structurelle et morphogénèse*. Dunod, 1974, p. 7–19. ISBN : 978-0805392722.
- [128] A. M. TURING. “The Chemical Basis of Morphogenesis”. In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences* 237.641 (1952), p. 37–72. ISSN : 09628436. DOI : [10.1098/rstb.1952.0012](https://doi.org/10.1098/rstb.1952.0012).
- [129] D. VAN HOOREBEKE. “L’émotion et la prise de décision”. In : *Revue Française de gestion* 34.182 (mar. 2008), p. 33–44.
- [130] D. WATSON et L. A. CLARK. “On Traits and Temperament - General and Specific Factors of Emotional Experience and Their Relation to the 5-Factor Model”. In : *Journal of Personality* 60.2 (1992), p. 441–476. ISSN : 00223506. DOI : [10.1111/j.1467-6494.1992.tb00980.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-6494.1992.tb00980.x).
- [131] D. WATSON et A. TELLEGEN. “Toward a consensual structure of mood.” In : *Psychological Bulletin* 98.2 (1985), p. 219–235.

- [132] B. WEINER. “The emotional consequences of causal attributions”. In : *M.S. Clark & S. T Fiske (eds), Affect and Cognition*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1982, p. 185–209.
- [138] S. WOLFRAM. “Statistical mechanics of cellular automata”. In : *Reviews of Modern Physics* 55.3 (juil. 1983), p. 601–644. DOI : [10.1103/RevModPhys.55.601](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.55.601).
- [139] S. WOLFRAM. “Universality and complexity in cellular automata”. In : *Physica D: Nonlinear Phenomena* 10.1–2 (1984), p. 1–35. ISSN : 0167-2789. DOI : [10.1016/0167-2789\(84\)90245-8](https://doi.org/10.1016/0167-2789(84)90245-8).
- [140] M. WOOLDRIDGE et N. R. JENNINGS. “Intelligent agents: Theory and practice”. In : *Knowledge engineering review* 10.2 (1995), p. 115–152.
- [141] W. M. WUNDT. *Vorlesungen über die menschen- und tierseele*. L. Voss, 1906, p. 243.
- [142] Z. XIAOPING, T. ZHONG et L. MENGTING. “Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches”. In : *Building and Environment* 44.3 (2009), p. 437–445. ISSN : 0360-1323. DOI : [DOI:10.1016/j.buildenv.2008.04.002](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.04.002).
- [143] K. YAMAMOTO, S. KOKUBO et K. NISHINARI. “Simulation for pedestrian dynamics by real-coded cellular automata (RCA)”. In : *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 379.2 (2007), p. 654–660. ISSN : 03784371. DOI : [10.1016/j.physa.2007.02.040](https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.02.040).
- [144] N. ZARBOUTIS et N. MARMARAS. “Design of formative evacuation plans using agent-based simulation”. In : *Safety Science* 45.9 (2007), p. 920–940. ISSN : 0925-7535. DOI : [DOI:10.1016/j.ssci.2006.08.029](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2006.08.029).
- [145] N. ZARBOUTIS et N. MARMARAS. “Searching efficient plans for emergency rescue through simulation: the case of a metro fire”. In : *Cogn. Technol. Work* 6.2 (mai 2004), p. 117–126. ISSN : 1435-5558. DOI : [10.1007/s10111-004-0150-6](https://doi.org/10.1007/s10111-004-0150-6).
- [146] M. ZHENG, Y. KUSHIMORI et T. KAMBARA. “A model describing collective behaviors of pedestrians with various personalities in danger situations”. In : *Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing 2002 ICONIP 02*. Sous la dir. de L. WANG et al. T. 4. 2002, p. 2083–2087.

Webographie

- [20] CABINETOFFICE. *Understanding crowd behaviours documents*. Aout 2012. URL : <http://www.cabinetoffice.gov.uk/resource-library/understanding-crowd-behaviours-documents>.
- [33] Y. DARTOIS et AL. *Modélisation des épidémies*. 2007. URL : www.irem.univ-paris-diderot.fr/articles/modelisation_des_epidemies/.
- [62] HUMANITE. *Bousculade dans un temple Hindou en Inde*. Septembre 2008. URL : <http://www.humanite.fr/Bousculade-dans-un-temple-hindou-en-Inde-au-moins-113-morts>.
- [71] LEPARISIEN. *Les mouvements de foule les plus meurtriers depuis 1990*. Novembre 2010. URL : www.leparisien.fr/international/les-mouvements-de-foule-les-plus-meurtriers-depuis-1990-22-11-2010-1161482.php.
- [87] NETLOGO. *NetLogo*. 1999-2013. URL : <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
- [104] REPAST. *The Repast Suite*. <http://repast.sourceforge.net/>. URL : <http://repast.sourceforge.net/>.
- [133] WIKIPEDIA. *Affordance*. Oct. 2012. URL : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Affordance>.
- [134] WIKIPEDIA. *Équations de Navier-Stokes*. Sept. 2010. URL : http://fr.wikipedia.org/wiki/Equations_de_Navier-stokes.
- [135] WIKIPEDIA. *Hans Eysenck*. URL : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Hans-Eysenck>.
- [136] WIKIPEDIA. *HSL and HSV*. 2012. URL : http://en.wikipedia.org/wiki/HSL_and_HSV.
- [137] WIKIPEDIA. *Bousculade*. Février 2012. URL : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Bousculade>.

Résumé

Ce travail présente une nouvelle approche de modélisation des phénomènes de panique dans le cadre de crise. L'approche proposée vise à couvrir la dimension cognitive, émotionnelle et physique de l'individu et repose sur une modélisation épidémiologique du processus de propagation de la panique.

Le modèle se décompose en deux grandes parties interdépendantes et complémentaires à savoir une étude de la mobilité et une étude des phénomènes de panique. L'étude de la mobilité est à la base du modèle, elle est construite selon une approche individu-centrée où les individus interagissent entre eux et avec leurs environnements pour produire des comportements cohérents. Le modèle de panique vient s'ajouter comme une couche qui peut modifier le patron de mobilité en modifiant l'écoulement du système. La mobilité et la panique forment par conséquent un système complexe dans lequel ils interagissent et s'influencent mutuellement faisant apparaître des propriétés émergentes d'amplification et/ou de régulation.

Ce travail s'intéresse également à une étude agrégative du processus de propagation de la panique. Cette étude vient représenter l'étude de propagation de la panique à un niveau de granularité différent. Nous proposons une formulation mathématique du modèle par des équations différentielles ordinaires (EDO), puis nous étudions la dynamique de croissance de la population des individus paniqués ainsi que la dynamique de diffusion de la panique.

Cette démarche mixte de travail permet de renforcer la complémentarité entre les modèles comportementaux microscopiques et les modèles dynamiques macroscopiques dans l'étude des phénomènes concrets sur divers échelles et de description.

Abstract

This work present a new approach for modeling panic phenomena in crisis situation. We aim for integrate cognitive, emotional and physical human dimension to get realistic individual behaviors and an epidemiological approach to study panic spreading on crowd.

The work is divided into two interdependent and complementary parts namely crowd mobility study and panic phenomena study. The study of mobility is the basis of the model, it's built in an individual centered approach in witch individuals interact with each other and with their environment to produce coherent behavior. The model of panic is added as a layer that can change the pattern of mobility by changing the flow of the system. Mobility and panic form then a complex system where they interact and influence each other.

This work is also interested in a aggregated study of panic spreading process. This study comes to represent panic spreading in a different level of granularity. We propose a mathematical formulation of the model by ordinary differential equations (ODE). We study then the dynamics growth of panicked peoples and the dynamics of panic diffusion on crowd.

This joint working approach helps strengthen the complementarity between the microscopic behavior patterns and macroscopic dynamic models in the study of concrete phenomena on various scales and description.