

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed KHIDER - BISKRA
Faculté des Sciences exactes et de Sciences de la nature et de la vie
Département d'Informatique

N° d'ordre :
Série :



Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en Informatique
Option : **Synthèse d'Images et Vie Artificielle**

Titre

**Une nouvelle approche de
modélisation des structures de groupe
d'une foule des piétons**

Présenté par : Moufida BENCHABANE

Soutenu le : 30 /05 /2011

Devant le jury :

NourEddine DJEDI	Pr	Université de Biskra	Président
Foudil CHERIF	MC	Université de Biskra	Rapporteur
Mustapha BOURAHLA	MC	Université de M'sila	Examineur
Med Chaouki BABAHENINI	MC	Université de Biskra	Examineur

À mes parents
À toute ma famille
À tous ceux qui me sont chers

Remerciements

Tout d'abord je remercie Dieu tout puissant qui m'a guidé vers le bon chemin.

Mes remerciements vont à mon encadreur, Mr Foudil CHERIF, Maître de conférence à l'Université Mohamed Khider de Biskra, qui a assuré la direction de mon travail à travers ses orientations et son aide dans la réalisation de ce travail.

Je remercie Mr NourEddine DJEDI, Professeur à l'Université Mohamed Khider de Biskra, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence de jury.

J'adresse mes sincères remerciements à Mr Mustapha BOURAHLA, Maître de conférence à l'Université de M'sila pour accepter de participer au jury de mon mémoire.

Mes remerciements sont aussi adressés à Mr Mohamed Chaouki BABAHENINI, Maître de conférence à l'Université Mohamed Khider de Biskra, qui a bien voulu faire partie du jury de mon mémoire.

Mes sincères remerciements vont également à mon frère Adel, Maître de conférence à l'Université Mohamed Khider de Biskra, pour ses précieuses remarques, son aide technique et ses orientations.

Je tiens plus particulièrement à remercier Mr Hachemi ABABSA, Maître Assistant à l'Université de Biskra, pour son soutien et ces encouragements durant la réalisation de ce travail.

Finalement, je remercie infiniment Mr Tarek ABABSA, Maître Assistant à l'Université de Médéa, pour son aide précieuse dans le démarrage de mon logiciel et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Sommaire	i
Introduction générale	1
Chapitre I : Simulation comportementale	
1 Introduction	5
2 Agents intelligents	5
2.1 Définition	5
2.2 Les différents types d'agents	8
3 Simulation comportementale	12
3.1 Introduction	12
3.2 Modélisation des propriétés des humains virtuels	13
4 Comportement de direction	16
4.1 Le comportement d'individu	18
4.2 Le comportement de groupes	27
4.3 Combinaison de comportements	30
5 Conclusion	31
Chapitre II : Piéton virtuel	
1 Introduction	33
2 Définitions	33
3 Classification des travaux de recherche sur les piétons	34
4 Les approches microscopique et macroscopique	36
4.1 Modèles macroscopiques	36
4.2 Modèles microscopiques	37
5 Observation du comportement des piétons	42
5.1 Environnement	42

5.2	Interactions avec l'environnement	43
5.3	Déplacements des piétons	44
6	Le comportement de navigation piétonnier	45
6.1	Représentation mentale de l'environnement de navigation	45
6.2	Processus mentaux de navigation	46
6.3	Résultats d'observation sur le comportement de navigation piétonnier	46
7	Conclusion	48
Chapitre III : Foule d'humains virtuels		
1	Introduction	50
2	La simulation de foule	50
3	Les modèles de foule	51
4	Situation de la foule	58
5	Classification des modèles de foule	59
6	Conclusion	61
Chapitre IV : Modélisation des structures de groupe		
1	Introduction	63
2	Le groupement et les groupes sociaux	63
3	Cadre de la modélisation des structures de groupe	64
3.1	Couche de moteur de simulation	65
3.2	Couche de modélisation de l'agent à base de comportement	65
3.3	Couche de modélisation de groupe	66
3.4	Relations entre les couches	67
4	Notre système de simulation d'une foule des piétons	68
4.1	Spécification de système de simulation d'une foule des piétons	68
4.2	Modèle de perception de l'agent	70
4.3	Modèle de comportement de l'agent	71
5	Modélisation des structures de groupe	74
5.1	Modélisation des connexions intra-groupe	76
5.2	Modélisation des relations inter-groupes	78
5.3	Calcul des paramètres de mouvement de l'agent	80
6	Etude des cas : Les formes de groupes sociaux	82
7	Conclusion	84
Chapitre V : Résultats et discussions		
1	Introduction	86
2	Architecture du système proposé	86
3	Algorithmes de base	91
3.1	Détection des piétons dans la zone de perception	92

3.2	Sélection de piéton à suivre	94
3.3	Calcul de GP	96
3.4	Calcul de GD	97
3.5	Calcul de V1	99
3.6	Calcul de V2	99
4	Validation du système implémenté	101
4.1	Effet du groupement de piétons sur le comportement de la foule	101
5	Conclusion	111
	Conclusion générale	113
	Références bibliographiques	117
	Annexe : Plate-forme ‘OpenSteer’	123

Introduction générale

La simulation de foules de piétons est un sujet d'actualité dans le domaine de l'infographie. L'importance de lancer des simulations de comportement de foules dans différentes situations réside dans l'impossibilité d'accomplir, d'une manière rapide et concluante, le comportement réel avec des humains. Pour cette raison, la simulation de la foule des piétons concerne beaucoup de domaines d'applications tels que la sécurité, le génie civil, l'urbanisme...etc. En génie civil par exemple, on s'intéresse aux caractéristiques de flux de foules des piétons afin d'assurer une évacuation sécurisée dans des situations d'urgences. Dans l'urbanisme et la conception des bâtiments, la simulation des foules des piétons est utilisée pour tester la fiabilité des équipements publics et des conceptions architecturales. La simulation de foule des piétons trouve aussi d'autres applications dans l'industrie de divertissement tels que les jeux vidéo, où on s'intéresse à la simulation de foules de piétons pour créer un rendu et un mouvement réaliste des piétons.

De nombreux modèles de simulation de foules de piétons ont été développés au cours des années (Qiu et Hu, 2010; Teknomo, 2002; Musse et Thalmann, 2001; Reynolds, 1999; Helbing et Molnar, 1995; Terzopoulos et al., 1994), ceux-ci peuvent être groupés dans deux approches principales :

- i) La première est d'utiliser des modèles visant à reproduire le comportement de piétons réels, afin de tester des hypothèses et de prédire le déroulement de phénomènes globaux. L'objectif est alors de pouvoir valider les résultats de la simulation, par exemple avec des mesures de flux macroscopiques (Berrou et al., 2005; Teknomo, 2002).
- ii) La seconde approche est d'utiliser des modèles qui permettent de donner une apparence réaliste à la simulation, afin qu'elle paraisse vraisemblable, sans s'attacher toutefois à la validité des résultats.

Les modèles de simulation basés sur des analogies avec les forces, comme le modèle de force sociale (Helbing et Molnar, 1995) ou le modèle de force magnétique (Okazaki, 1979) trouvent leur place dans la première catégorie. Ils permettent par exemple de reproduire avec succès des phénomènes de panique (Helbing et al., 2000).

Dans la seconde catégorie, le premier travail est réalisé par Reynolds. Il a développé des techniques permettant de créer des comportements réalistes à partir de briques élémentaires simples (Reynolds, 1999). Ce modèle se place dans le contexte d'agents virtuels situés et réactifs, le domaine d'application ciblé est l'animation et les médias interactifs comme les jeux ou la réalité virtuelle (par exemple, les personnages non-joueurs des jeux vidéo) (Lacroix, 2009). Dans cette même catégorie, on trouvera des modèles plus proches du monde de l'animation, parfois inspirés des travaux de Reynolds. Par exemple, 'ViCrowd' de Musse et Thalmann (2001), ils ont proposé un système pouvant créer une foule virtuelle, dont les individus ont des niveaux d'autonomie variables. Par ailleurs, d'autres travaux ont parmi d'enrichir davantage les comportements de foules tels que l'étude de Shao & Terzopoulos. Les auteurs ont développé des techniques d'un type comparable pour animer des foules dans des simulations de vie artificielle (Shao et Terzopoulos, 2007). Plus récemment Qiu (2010) a proposé un modèle uniforme pour la modélisation des différentes structures de groupes d'une foule de piétons. Dans son travail, il a défini la foule comme un ensemble de groupes, où chaque groupe est composé d'un ou de nombreux individus. Il a considéré deux aspects : la structure intra-groupe et les relations inter-groupe, dans cette plate-forme, l'auteur a développé un modèle de simulation d'une foule de piétons.

De point de vue pratique, Reynolds a implémenté en 2004 son modèle, proposé en 1999, où il a développé la fameuse bibliothèque ouverte 'OpenSteer' (Reynolds, 2004). Cette dernière permet de reproduire différents comportements de directions d'un ensemble d'objets autonomes dans les jeux vidéo et les simulations multi-agents. Ces agents peuvent représenter des caractères (humains, animaux, créatures), des véhicules (voitures, avions, vaisseaux spatiaux) ou d'autres types d'agents mobiles (Reynolds, 2004).

Dans ce contexte, le présent travail vient pour introduire cette thématique - consistant à comprendre, modéliser, et simuler le comportement d'une foule de piétons en utilisant la plate forme OpenSteer - traitée pour la première fois dans notre laboratoire, LESIA.

Dans ce mémoire, la foule est considéré comme étant un ensemble de groupe de piétons où une relation intra et/ou inter groupe est définie préalablement par l'utilisateur pour chaque

simulation. Cette même logique a été suivie récemment par (Qiu, 2010), dans son travail de thèse de doctorat, et nous a servi comme modèle de référence. Par conséquent, nous avons étudié d'abord les détails de notre approche par la suite nous avons procédé à l'implémentation de notre modèle en utilisant la plate forme OpenSteer (Reynolds, 2004).

Le mémoire est organisé en deux parties :

La première partie présente l'état de l'art de tous les aspects qui entrent dans le domaine de la simulation de foules, elle s'articule sur trois chapitres : i) Le premier chapitre est introductif, il présente les caractéristiques générales de l'agent ainsi que le domaine de la simulation comportementale. ii) Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de piéton virtuel, nous présentons une classification des travaux de recherche sur les piétons. iii) Le troisième chapitre présente les modèles de simulation de foule qui ont été discuté dans la littérature avec une comparaison des avantages et des inconvénients de chacun.

La seconde partie du document est dédiée à la présentation de notre approche de modélisation des structures de groupe d'une foule de piétons. Elle se divise en deux chapitres : i) le premier chapitre se focalise sur la conception détaillée de notre système de simulation, il présente la vue d'ensemble de l'architecture en couches de système suivie de la description détaillée de chaque couche. ii) Le deuxième chapitre présente l'implémentation de notre système dans l'environnement Opensteer avec une comparaison des résultats obtenus avec celles de Qiu (2010).

Chapitre 1

Simulation comportementale

1	Introduction	5
2	Agents intelligents.....	5
3	Simulation comportementale.....	12
4	Comportement de direction.....	16
5	Conclusion.....	31

1 Introduction

La simulation comportementale est un moyen de faire interagir de manière naturelle des acteurs en simulant leurs capacités dans un environnement. Elle est introduite dans plusieurs domaines d'applications tels que : le graphisme, la robotique, les jeux vidéo et les films. La simulation comportementale a pour objectif la production de comportements pour les acteurs de l'animation, l'objectif majeur de la modélisation des comportements de ces acteurs est de construire des agents intelligents.

Ce premier chapitre a pour objectif de présenter l'agent intelligent et le domaine de la simulation comportementale. Après avoir rappelé les principales définitions et les différents types de l'agent intelligent, nous nous appuyons sur les humains virtuels lors de la seconde section dédiée à la représentation de la simulation comportementale. Ces humains virtuels possèdent des propriétés remarquables qu'il est utile de présenter dès à présent afin de mieux appréhender les prochains chapitres.

Nous concluons ce chapitre en présentant une petite introduction sur les comportements de direction, puis nous détaillons les célèbres comportements d'individu et de groupes présentés dans les travaux de Reynolds (1999).

2 Agents intelligents

2.1 Définition

L'intelligence artificielle a pour but de reproduire l'intelligence humaine au niveau des entités informatiques. Si ces entités sont capables de percevoir et d'agir au sein d'un environnement, nous pouvons les appeler agents (Russell et Norvig, 1995). L'environnement joue un rôle particulièrement important dans la définition de la notion agent. En effet, ce dernier peut être vu comme un ensemble de ressources externes dont dispose l'agent et de règles, qui guident son évolution et qui subissent les conséquences de ses actions.

Russell et Norvig définissent donc un agent comme étant n'importe quelle entité qui perçoit son environnement au travers de ses capteurs et sur qui elle agit via ses effecteurs (figure 1.1). Un être humain peut donc être vu comme un agent. Un robot muni de caméras, de capteurs infrarouges, ... etc, et de différents moteurs pour générer des actions peut être aussi considéré comme un agent (Bouzaïd, 2001).

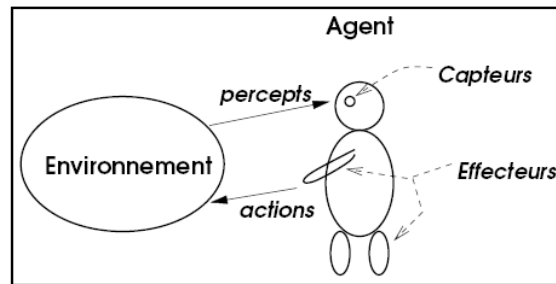


Figure 1.1 : La définition d'un agent au sens de Russell et Norvig (1995).

Cette définition nous permet d'introduire la notion d'interaction entre l'agent et l'environnement. Cette interaction peut être définie comme étant l'influence mutuelle entre ces deux entités, qui est établie via les processus de perception de l'agent de son environnement et de son action sur ce dernier. L'interaction peut être directe, comme dans le cas de l'action de l'agent sur l'environnement, c'est une modification explicite de l'état de ce dernier. Elle peut aussi être indirecte, comme dans le cas de la perception de l'environnement par l'agent, l'environnement ne peut pas modifier lui-même l'état de l'agent, mais ce dernier peut changer d'état en fonction des percepts récupérés à partir de l'environnement.

La définition de Russell et Norvig introduit la notion d'environnement sans la définir. Elle est aussi très générale, ce qui permet d'identifier les agents dans plusieurs domaines d'applications. Mais, nous pensons que les entités qui sont en interaction avec l'environnement doivent avoir certaines propriétés afin de pouvoir être appelées 'agent'.

Nous présentons donc dans ce qui suit d'autres définitions pour l'agent basées sur les propriétés.

J. Ferber a proposé une définition pour le terme 'agent' dans son livre (Ferber, 1995). Il le considère comme étant une entité physique ou virtuelle :

- qui est capable d'agir au sein d'un environnement.
- qui peut communiquer directement avec d'autres agents.
- qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction qu'elle cherche à optimiser).
- qui possède des ressources propres.
- qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement.

- qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune).
- qui possède des compétences et offre des services.
- qui peut éventuellement se reproduire.
- dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

Cette définition introduit des caractéristiques intéressantes pour l'agent, comme la notion d'objectif et de perception limitée ou locale de l'environnement, puisque c'est le cas dans plusieurs applications. En effet, un robot mobile a généralement un certain rayon de perception, pour observer son environnement physique. Un agent mobile dans le réseau Internet ne peut pas non plus observer tout le réseau, il ne peut en observer qu'une partie. Nous trouvons cependant que certains points dans cette définition sont un peu plus détaillés que nécessaires (comme les notions de tendances et de la reproduction), alors que d'autres qui sont aussi importants pour la définition d'un agent ont été oubliés (décrits ci-dessous).

M. Wooldridge et R. Jennings (Jennings et al., 1998; 1995) ont défini un agent comme étant un système informatique *situé* dans un environnement, et dans lequel il est capable d'agir de façon *souple* et *autonome*, afin de satisfaire les objectifs pour lesquels il a été conçu.

Un agent est dit *situé*, s'il perçoit son environnement via ses capteurs, et peut en changer la configuration en agissant dessus via ses effecteurs.

La notion d'*autonomie*, signifie la capacité d'action sans intervention de l'utilisateur. Un agent autonome doit à chaque instant choisir quelle action effectuer parmi un ensemble d'actions possibles, ce choix doit s'établir uniquement en fonction de ses perceptions, de son état interne et de ses objectifs.

La *souplesse* au niveau de l'action sera acquise lorsque l'agent vérifie les propriétés suivantes :

- la réactivité : la capacité de répondre aux événements extérieurs.
- La pro-activité : la capacité de prédire et d'anticiper les changements dans l'environnement et agir en fonction d'eux.

- La sociabilité : la capacité de communiquer et d'interagir avec les autres agents. Cette propriété est intéressante uniquement dans le cas où nous nous intéressons à l'aspect multi-agent.

Un agent est donc une entité physique ou virtuelle en situation dans un environnement avec lequel il interagit. Nous pensons aussi que la notion de situation est importante pour la définition d'un agent. En effet, elle est nécessaire pour implanter par exemple la propriété de la réactivité au niveau de l'agent. Cette dernière, à son tour, assure que l'agent réponde dans certaines situations imprévues rapidement et correctement. Une autre propriété importante dans cette définition est celle de l'autonomie, puisque sans cette dernière l'agent se réduit à un simple objet informatique qui possède des données et offre des méthodes (Bouزيد, 2001).

2.2 Les différents types d'agents

2.2.1 Les agents délibératifs

Historiquement le concept de 'délibération' provient du domaine de l'intelligence artificielle où s'est développée l'idée de raisonner sur des symboles. Ces symboles représentant l'état de l'agent (état mental) et celui de son environnement (Conti, 2000). D'après Newell et Simon (1976) un système de symbole physique consiste en un ensemble d'entités appelées symboles ou formes organisées (motifs), qui peuvent être associées, par le jeu d'une ou de plusieurs relations, en de plus grandes structures et peuvent être transformées par un petit ensemble de processus de base. Ces processus peuvent créer de nouveaux symboles, créer et modifier des relations entre les symboles, stocker plus ou moins indéfiniment des chaînes de symboles, ou encore comparer des symboles par identité ou par différence. L'hypothèse du système de symbole physique dit qu'un tel système dispose des moyens nécessaires et suffisants pour exercer une action générale intelligente.

Un agent délibératif (aussi appelé agent cognitif) est donc une entité qui contient une représentation explicite et symbolique du monde à partir de laquelle la prise de décision (par exemple quelle action accomplir) sera faite par le biais de raisonnements logiques (ou pseudo logiques), ces derniers étant basés sur l'appariement de motifs et la manipulation symbolique. En résumé, un agent délibératif utilise une représentation interne de son environnement afin de formuler des plans d'actions pour satisfaire ses buts. Ceci est

généralement réalisé à l'aide d'un moteur d'inférences fonctionnant sur le principe suivant (Cherif, 2006) :

$$\text{état courant du monde} + \text{but} \rightarrow \text{plan}$$

Le principal intérêt des agents délibératifs est leur capacité à pouvoir former des plans à long terme en anticipant plus ou moins les états futurs de l'environnement. Cependant, bien que l'utilisation des règles symboliques soit intuitive et d'un niveau d'abstraction élevé, l'approche délibérative présente des problèmes reconnus :

- La difficulté de représenter tous les états possibles d'un environnement complexe et dynamique à l'aide de symboles en nombre fini : excepté pour des environnements relativement petits et prévisibles, il est impossible de prévoir toutes les situations que pourrait rencontrer un agent. Ceci rend l'approche délibérative fragile et généralement spécifique à un problème particulier.
- La maintenance de la base de règles : dans un environnement dynamique et imprévisible, le système doit maintenir sa consistance. Ceci implique sa mise à jour fréquente par ajout ou modification de règles. Cette modification pouvant être effectuée par l'agent lui-même (cas d'un agent adaptatif) ou l'utilisateur, peut générer des conflits déstabilisant le système comportemental.
- Le manque de réactivité pour les applications temps réel : l'opération de planification n'est généralement pas interruptible et coûteuse en temps de calcul. Ceci induit deux problèmes potentiels. Premièrement, il se peut que l'environnement, s'il est dynamique, ait été modifié sur la durée de la planification. Ainsi, la prise de décision ne tenant plus compte de l'état courant, l'action à effectuer peut s'avérer invalide au moment de l'exécution du plan. Deuxièmement, si la réalisation d'une action est impossible, il faut recommencer la planification afin de tenir compte de la nouvelle situation (Sanchez, 2005).

2.2.2 Les agents réactifs

Afin de pallier le manque de robustesse, de réactivité et d'adaptabilité des agents cognitifs, les chercheurs ont proposé, dès le milieu des années 80, des agents plus simples, n'utilisant pas de représentation interne de leur environnement et prenant leur décision de façon réflexe à partir d'un stimulus. En effet, d'après Brooks (1986), Steels (1994) ou Maes (1994), un comportement intelligent peut être généré sans représentation symbolique explicite ni raisonnement abstrait : il émergera des interactions de l'agent avec son

environnement complexe. Ainsi, un agent réactif est un agent qui déclenchera une action prédéfinie pour chaque configuration de ses capteurs, sans passer par la phase de planification à partir d'une représentation interne de son environnement. Ce type d'agent peut être implémenté à l'aide d'un système de règles simples, ou d'un automate, selon le principe suivant (Cherif, 2006) :

état courant du monde → action

Comme tous les agents intelligents, l'agent réactif va agir pour atteindre ses objectifs. Pour cela Brooks a proposé une architecture d'agent consistant en un ensemble de comportements pour l'accomplissement d'une tâche, où chaque comportement est une machine à états finis qui fait correspondre les entrées des capteurs aux actions des effecteurs. Ces comportements sont généralement organisés en couche, allant du plus simple (éviter les obstacles dans le cas d'un robot,...) au plus sophistiqué. Si à un instant donné plusieurs actions sont générées à partir de différents comportements activés, la résolution de conflit sera effectuée par interaction entre les différentes actions (par exemple, une action inhibe l'autre) (Brooks, 1986).

De nombreuses architectures réactives ont été proposées et appliquées avec succès, notamment en robotique. Le fonctionnement de type stimulus-réaction des agents réactifs, ainsi que leur caractère usuellement déterministe, en font des systèmes robustes, nécessitant peu de maintenance (ils n'ont pas de bases de règles à mettre à jour) et économes en ressources matérielles (que ce soit au niveau de l'occupation mémoire ou du temps de calcul) (Cherif, 2006). Mais malheureusement ces architectures réactives présentent des limites dues aux points suivants :

- L'agent n'a pas de représentation mentale de l'environnement et il doit choisir les bonnes actions à partir des données locales uniquement, ce qui n'est pas toujours évident.
- Le comportement global de l'agent ne peut être facilement prévu, puisqu'il émerge de l'interaction entre les comportements de ses différentes couches. Par conséquent, il n'est pas toujours possible de concevoir un comportement d'agent en fonction du but spécifié (Bouziid, 2001).

2.2.3 Les agents hybrides

Intuitivement l'architecture réactive semble plus adaptée à la réalisation de comportements temps réels, tandis que l'architecture délibérative est plus efficace pour résoudre des

problèmes plus complexes. Pour obtenir une architecture capable d'exhiber à la fois des comportements réactifs et délibératifs, les chercheurs ont proposé un nouveau type d'architecture appelée l'architecture hybride.

Les agents hybrides sont généralement des agents cognitifs intégrant des capacités réactives. L'association des deux méthodes permet de combiner leurs qualités complémentaires (planification, abstraction, réactivité) tout en limitant leurs défauts respectifs (figure 1.2) (Cherif, 2006).

2.2.4 Agents intelligents et humains virtuels

Les processus de la cognition humaine sont des plus complexes à modéliser sous la forme d'un agent intelligent. Dans l'optique de la simulation comportementale des êtres humains, Newell (1990) définit les contraintes qu'un agent idéal doit respecter pour simuler au mieux ce processus :

- flexibilité et autonomie : l'agent doit pouvoir s'adapter à des changements d'environnement;
- interactions 'temps réel' avec l'environnement;
- richesse et complexité du comportement et du savoir;
- utilisation de concepts abstraits (symbolisme et généralisation);
- persistance (l'agent doit pouvoir réitérer des solutions éprouvées) et apprentissage;
- autonomie partielle ou vie en société : l'agent est régi par des lois sociales (groupe);
- conscience de soi et perception, l'agent doit pouvoir s'extérioriser à travers ses actions en fonction de sa situation;
- évolution à la fois de l'architecture le définissant (extensibilité) et de son espèce.

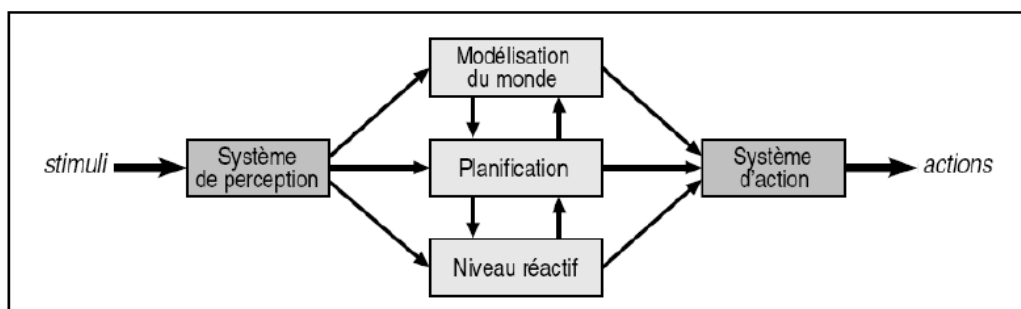


Figure 1.2 : Un agent hybride.

Newell n'a cependant pas mentionné un autre concept qui semble essentiel lors de la simulation de personnages virtuels : l'illusion de crédibilité. En effet, de nombreux chercheurs soulignent le fait que l'agent doit se comporter de manière suffisamment crédible et 'intelligente' pour que son attitude soit perçue comme similaire à celle d'un être réel, ceci étant d'autant plus vrai si le personnage est humanoïde et réaliste (Ruttkay et al., 2002).

De nos jours, les connaissances en informatique ne semblent pas encore suffisantes pour permettre la réalisation d'un système décisionnel capable de satisfaire toutes ces contraintes. Aussi, les différentes architectures présentées dans la littérature permettent toutes la simulation d'agent intelligent mais aucune ne remplira exactement toutes les spécifications requises par Newell (1990). L'illusion de crédibilité est plus facile à rendre en raison de sa subjectivité et des attentes du concepteur ou de l'utilisateur d'un système spécifique (Cherif, 2006).

3 Simulation comportementale

3.1 Introduction

Telle que définie par Rodriguez et al. (2001), « la simulation (ou l'animation) comportementale est une partie de l'animation qui se rapproche des systèmes réels de par son principe de fonctionnement en assignant aux acteurs ou systèmes animés des comportements indépendants. Ces derniers ne seront alors plus régis par un système global gérant le mouvement de tous les acteurs mais par un mécanisme de décision local placé dans chaque individu. La simulation comportementale est donc un moyen de faire interagir de manière naturelle des acteurs en simulant leurs capacités dans un environnement ».

L'animation comportementale est donc une branche de l'animation ayant pour objectif la production de comportements pour les acteurs de l'animation. Pour bien comprendre cette nécessité il est impératif de cerner préalablement les enjeux actuels de l'animation.

L'animation par ordinateur est elle-même issue de l'informatique graphique, une discipline qui a pour but de produire des images grâce à des moyens informatiques. De la même manière que la photographie a donnée naissance au cinéma, l'animation est apparue dès que les moyens techniques se sont révélés suffisants. Aujourd'hui, elle occupe une place prépondérante dans la création de jeux vidéo, d'applications de réalité virtuelle

(visites virtuelles de villes ou de lieux historiques, communautés virtuelles, simulations d'entraînement, ...etc.) (Panzoli, 2008).

3.2 Modélisation des propriétés des humains virtuels

L'objectif majeur de la modélisation des comportements des acteurs est de construire des agents intelligents autonomes virtuels avec adaptation, perception et mémoire, capable d'agir librement et avec émotion, d'être conscient et imprévisible (figure 1.3).

3.2.1 La perception

La perception est définie comme la conscience des éléments dans l'environnement à travers des sensations physiques. Il est réalisé en équipant les agents avec des détecteurs visuels, tactiles et auditifs ainsi ils simulent le comportement quotidien humain (aspect visuel, mouvement, réaction..). Le sous-système perceptuel le plus important est le système visuel. Une approche basée sur la vision (Renault et al., 1990) est idéale pour le modelage d'une animation comportementale. Elle offre une approche universelle pour le passage d'information de l'environnement à l'acteur dans le contexte de recherche de chemin.

A un niveau plus haut, nous pouvons décomposer la perception comme suggérée par (Becheiraz et Thalmann, 1998). La perception d'un acteur peut être limitée aux objets et à d'autres acteurs dans le voisinage. Mais cela limite le nombre de comportements possibles, parce que seules la présence et les caractéristiques d'un objet ou d'un acteur sont impliquées dans la sélection d'un comportement. Les actions des autres acteurs ne sont pas prises en considération.

Le module de perception produit trois types de perception : la perception de la présence d'objets et d'acteurs, la perception des actions d'acteurs et la perception d'acteurs exécutant des actions sur des objets (Cherif, 2006).

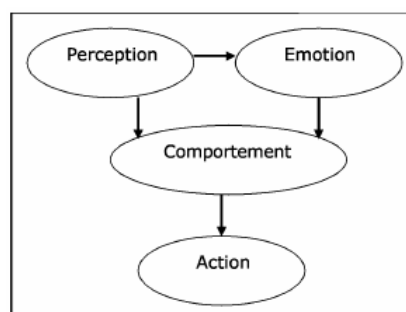


Figure 1.3 : Structure du modèle comportemental (Becheiraz et Thalmann, 1998).

3.2.2 L'émotion

Depuis très longtemps, l'émotion y est la source de beaucoup de recherches scientifiques sur le problème de sa définition et de sa composition. A l'origine, l'émotion est une notion de l'esprit. Elle est donc bien analysée et bien étudiée par les physiologistes et les psychologues. Au cours du temps, plusieurs recherches ont prouvé que les activités humaines sont beaucoup influencées par l'état émotionnel. Cette évidence donne lieu à la naissance de l'intégration de l'aspect d'émotion dans la recherche concernant les activités quotidiennes de l'humain, y compris par exemple la communication, la négociation, l'apprentissage, les activités commerciales, ... etc (Thi Hai Ha, 2008).

L'émotion peut être définie comme l'aspect affectif de la conscience : Un état de sentiment, une réaction psychique et physique (comme la colère ou la crainte), subjectivement expérimenté comme un sentiment fort et physiologiquement qui augmente les changements préparant le corps pour une action vigoureuse immédiate.

Les acteurs doivent être capables de répondre, avec émotion à leur situation et agissant physiquement à cela. Les émotions visibles fournissent des designers avec un moyen direct pour affecter à l'utilisateur un état émotionnel propre à lui. Les acteurs sont donc équipés d'un modèle informatique simple de comportement émotionnel, qui est lié au comportement comme les expressions de visage qui peuvent être employées pour influencer leurs actions.

Une émotion est la réaction d'une personne à une perception. Celle-ci est amenée à répondre par une expression du visage, un geste, ou à choisir un comportement spécifique. Une émotion arrive entre une perception et la réaction suivante. Deux personnes différentes peuvent avoir des réactions différentes à la même perception, selon la façon dont ils sont affectés par cette perception (Ortony et Turner, 1990).

Les émotions sont causées par la réaction aux objets, les actions d'agents et les événements. Les émotions causées par des événements peuvent être classées selon trois types d'émotions :

- Les émotions causées par des événements potentiels.
- Les événements affectant le destin d'autres.
- Les événements affectant le bien-être de l'acteur.

Chaque classe est caractérisée par des conditions d'apparition pour chacune de ses émotions et variables affectant son intensité. Les émotions auxquelles est soumis un acteur sont dues à sa perception (Cherif, 2006).

3.2.3 Le comportement

Le comportement est souvent défini comme la voie dans lequel les animaux et les humains agissent. Il est usuellement décrit en termes de langage naturel qui a la signification sociale, psychologique ou physiologique, mais qui n'est pas nécessairement facilement réductible au mouvement d'un ou deux muscles.

Le comportement est aussi la réponse d'un individu, groupe, ou espèce à son environnement. Le comportement ne réagit pas seulement à l'environnement, mais inclut aussi le flux d'information par lequel l'environnement agit sur la créature vivante aussi bien sur la façon dont la créature code et emploie cette information.

Le comportement peut être décrit d'une façon hiérarchique. Le modèle comportemental décompose un comportement en comportements plus simple qui peuvent être décomposés plus loin. Chaque niveau de cette décomposition hiérarchique contient un ou plusieurs comportements exécutés séquentiellement, ou bien concurremment. Un niveau de la hiérarchie contenant plusieurs comportements pour être exécuté séquentiellement, appelé comportement.

Chaque comportement d'un ordre de comportement est appelé cellule comportementale. La cellule comportementale contient les comportements qui sont exécutés chacun concurremment, ou exclusivement quand les règles d'inhibition sont spécifiées. Les comportements contenus dans une cellule comportementale sont de nature composée ou élémentaire. Un comportement permet une décomposition récursive dans la hiérarchie. Un comportement élémentaire est placé au fond de la décomposition hiérarchique et encapsule un comportement spécialisé qui contrôle directement une ou plusieurs actions. Un comportement est exécuté récursivement : en fait la hiérarchie du comportement permet d'exécuter les comportements élémentaires des entités à chaque niveau de la structure de la hiérarchie.

Pour contrôler le comportement global d'un acteur, on exploite une pile de comportements. Au début de l'animation, l'utilisateur pousse un ordre de comportements dans la pile de l'acteur. À la fin du comportement actuel le système d'animation passe le comportement

suivant de la pile et l'exécute. Ce processus est répété jusqu'à ce que la pile de comportement de l'acteur se vide.

Avec ce contrôle de comportement employant une pile, un acteur devient plus autonome et crée ses propres sous buts en exécutant le scénario original (Cherif, 2006).

3.2.4 L'action

Basé sur l'information perceptuelle, le mécanisme comportemental d'un acteur détermine les actions à exécuter. Les actions peuvent avoir plusieurs degrés de complexité. Un acteur peut se développer dans son environnement ou bien agir réciproquement avec l'environnement ou encore communiquer avec d'autres acteurs.

Les actions sont exécutées en employant une architecture de mouvement commune. Le module d'action gère l'exécution des actions employées par un comportement en animant un modèle d'homme générique basé sur une hiérarchie de nœud. Il permet l'exécution simultanée ou séquentielle d'actions en gérant des transitions lisses entre des actions finales et des actions amorçantes (Boulic et al., 1995). Une boucle comportementale conduit l'animation, son rôle est de mettre à jour l'état du monde virtuel.

A chaque itération, le temps est incrémenté, le monde virtuel est mis à jour avec en particulier une mise à jour de l'état de chaque objet et acteur. Dans le cas d'un acteur, la perception est d'abord exécutée, après ses émotions sont produites avant que son comportement et ses actions ne soient exécutés (Cherif, 2006).

3.2.5 La mémoire

La mémoire est d'habitude définie comme le pouvoir ou le processus de reproduction ou de rappel de ce qui a été appris et conservé, particulièrement par les mécanismes associatifs. La mémoire est aussi le dépôt pour des informations apprises et à conserver, générées à partir de l'activité d'un organisme ou d'une expérience.

La mise en œuvre de la mémoire pour un acteur n'est pas très complexe, comme la mémoire est déjà un concept clef en informatique. Par exemple, Noser et Thalmann (1997) ont proposé une troisième mémoire visuelle globale qui permet à un acteur de retenir l'environnement, de le percevoir et de s'adapter à ses changements.

4 Comportement de direction

La première version du projet de comportements de direction a été créée en tant qu'élément du cours sur la programmation orientée d'objet dispensé par le professeur Jürgen Sauer en

2001 à Université d'Oldenburg, Germany. En fait, le but du cours était de programmer un applet Java. Le projet 'de comportements de direction' a été basé sur un article à la manifestation de l'ACM Siggraph 2001 proposé par Robin Green à SIGGRAPH 2000 cours 39. La première version a présenté un système avec des combinaisons de comportements simples. Un langage de description a été défini pour pouvoir créer les scénarios définis pour l'utilisateur (comportement des différents acteurs).

Tous les comportements décrits dans l'article de Craig Reynolds seraient maintenant mis en application. L'intelligence de la simulation serait mise en valeur par un système de commande spéciale du comportement. Ceci laisserait ajuster l'intelligence selon la définition de la scène. Au lieu d'utiliser un langage de description de propriété industrielle pour les scènes, le métalangage XML a été choisi comme remplacement. Les scènes sont ainsi définies en utilisant un langage de plate-forme indépendant, normalisé et inter opérable. Pour soulager la création des scènes définies pour l'utilisateur, un éditeur a été mis au point à l'effet de permettre la lecture, le stock de fichiers XML et la mise en place de chaque scène.

Les comportements de direction sont la prochaine étape logique dans le développement ultérieur du modèle des 'boids' créé par Craig Reynolds en 1987. Le modèle sur ordinateur des 'boids' est une voie pour la simulation des mouvements coordonnés de bandes d'oiseaux ou de poissons. 'Boids' identifie ici un exemple de créatures simulées. Le modèle est bâti sur trois comportements distincts : séparation, alignement et cohésion. Le comportement de *séparation* a été employé pour empêcher des situations où les membres de l'essaim se serrent. *Alignant* a été employé pour orienter tous les éléments de la bande dans une direction commune. Le troisième comportement de *cohésion* pour orienter un élément de l'essaim dans une position moyenne par rapport à ses voisins. Reynolds pouvait créer une simulation réaliste des comportements normaux de l'essaim par une combinaison habile de ces trois comportements simples.

Un premier exemple pour l'utilisation de ce modèle est le film court 'Stanley et Stella cassant la glace'. Il a été créé par la Division de graphique de la société Symbolics dans une coopération avec les studios de production de Whitney/Demos en 1987. La première apparence était dans le théâtre électronique chez ACM Siggraph 1987. (Stanley and Stella in) Breaking the Ice, 1987, Symbolics and Whitney/Demos).

Dans son article intitulé " ne pas se cogner dans les choses " en 1988, Craig Reynolds a présenté, évalué et implémenté les algorithmes pour l'évitement d'obstacles de chaque 'boid' individuel qui ont été utilisés pour la mise au point de cette production. Il a décrit plusieurs possibilités pour des algorithmes et des règles pour l'évitement d'obstacles (Reynolds, 1999). Les stratégies ne sont pas basées sur des techniques complexes de planification et des algorithmes novateurs, ils utilisent plutôt l'information locale : par exemple l'objet dans le rayon proche autour du véhicule. Le travail de Reynolds sur des comportements de direction, présentés à la conférence de réalisateur de jeux en 1999, met en valeur les comportements déjà présentés dans le modèle des 'boids' initiaux. Selon la combinaison des comportements le véhicule peut être configuré pour manipuler une situation complexe différente. Les comportements groupés sous le nom des 'comportements de direction' sont seulement le niveau le plus bas pour un Système Autonome (Reynolds, 1999).

Robin Green a présenté un papier intitulé "les comportements de direction". Dans ce travail qu'il établit sur la base des travaux Reynolds, il analyse les comportements décrits et évoque des exemples sur la façon dont ceux-ci peuvent être mis en application en utilisant le langage C++. En outre, plusieurs problèmes et les solutions correspondantes sont discutés. Le jeu peut être vu comme l'utilisation réussie des comportements de direction. Les caractères autonomes dans le jeu sont des comportements simples d'utilisation commandés, ils montrent le genre de réalisme qui peut être réalisé.

Le projet "comportements de direction" représente une très bonne référence pour des personnes s'intéressant aux travaux de Craig Reynolds sur la simulation des essaims (Cherif, 2006).

4.1 Le comportement d'individu

4.1.1 Comportement de recherche et de fuite

La recherche et la fuite sont deux comportements très simples qui déplacent un véhicule vers ou loin d'une position de cible avec une vitesse constante. Dans le cas de la recherche, quand le véhicule atteint la cible il satellisera la cible comme une mite bourdonnant autour d'une ampoule (par opposition à une planète tournant autour d'une étoile) (figure 1.4).

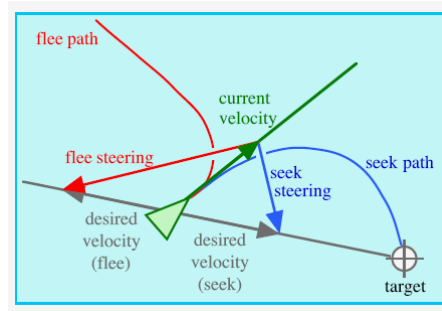


Figure 1.4 : le comportement de recherche et de fuite (Reynolds, 1999).

```

Vector2d Seek::calculate(const Vector2d &target)
{
    desired_velocity = normalise(target - pos) * max_speed;
    return desired_velocity - vel;
}

```

```

Vector2d Flee::calculate(const Vector2d &target)
{
    desired_velocity = normalise(pos - target) * max_speed;
    return desired_velocity - vel;
}

```

La différence entre la recherche et la fuite est que la recherche est l'acte d'orienter le caractère vers une position indiquée dans l'espace global. Ce comportement ajuste le caractère de sorte que sa vitesse soit radicalement alignée vers la cible. Notez que cela est différent d'une force attrayante (telle que la pesanteur) qui produirait une voie d'accès orbitale autour du point de cible. 'La vitesse désirée' est un vecteur dans la direction du caractère à la cible. La longueur de 'la vitesse désirée' pourrait être la vitesse maximale 'max_speed', ou la vitesse actuelle du caractère selon les particularités de l'application. Le vecteur de direction est la différence entre cette vitesse désirée et la vitesse actuelle du caractère.

D'une manière simple, la fuite peut être considérée comme étant l'inverse de la recherche. Elle agit en orientant le caractère de sorte que sa vitesse soit radicalement alignée loin de la cible. La vitesse désirée se dirige dans la direction opposée.

4.1.2 Comportement de poursuite et évasion

La poursuite est semblable à la recherche sauf que la carrière (cible) est un autre caractère mobile. La poursuite adéquate exige une prévision de la future position de la cible, alors ce

comportement présente les cibles prédictives : donner une cible mobile à l'interception, le caractère prévoit d'abord où la cible sera et s'oriente vers cette position :

```
Vector2d Pursuit::calculate(const Pilot &target)
{
float dist = (target.pos - pos).length();
Vector2d target_pos = target.predict(dist/max_speed);
desired_velocity=normalise(target_pos-pos)* max_speed;
return desired_velocity - vel;
}
```

l'approche adoptée ici est d'utiliser un prédicateur simple et réévaluer chaque étape de simulation, la stratégie la plus simple à coder est de supposer que le véhicule cible se déplace avec une vitesse constante et ne tourne pas avant l'arrivée, ainsi le predict() donne quelque chose comme :

```
Vector2d Pilot::predict(float time)
{
return pos + time * vel;
}
```

Alors que cette prétention soit souvent incorrecte, la prévision résultante sera seulement utilisée pendant environ 1/30 d'une seconde. La position d'un caractère dans T unités de temps à l'avenir (l'assumer pas manœuvre) peut être obtenue en mesurant sa vitesse par T et en ajoutant cette distance à sa position actuelle. La direction de poursuite est alors simplement le résultat de l'application du comportement de direction de recherche à l'emplacement prévu de la cible (figure 1.5).

Une autre approche de la recherche s'intéresse aux techniques de poursuite. Elle est basée sur le fait que lorsque notre acteur est sur le point d'avoir une collision avec une cible, elle apparaîtra à une distance constante dans l'espace local de notre acteur. Réciproquement

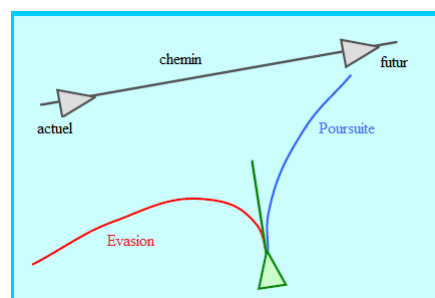


Figure 1.5 : le comportement de poursuite et d'évasion (Reynolds, 1999).

notre acteur peut s'orienter vers l'interception en s'arrangeant pour garder la cible à une distance constante.

La clé de cette implémentation de poursuite est la méthode employée pour estimer l'intervalle T de prévision. Dans le meilleur des cas, T serait le temps jusqu'à l'interception mais cette valeur est inconnue parce que l'acteur peut faire des manœuvres arbitraires et imprévisibles. On pourrait assumer que T est une constante qui, malgré que naïve, produirait une meilleure poursuite que la recherche simple (qui correspond à $T=0$). Cependant, pour une exécution raisonnable, T devrait être plus grand quand la cible est loin de l'acteur, et petit quand ils sont voisins. Un estimateur simple de la qualité modérée est $T=Dc$ où D est la distance entre la cible et l'acteur, et c est un paramètre de rotation.

Un estimateur plus sophistiqué peut être obtenu en tenant compte des entêtes relatifs de la cible et de l'acteur, à condition que la cible soit généralement en avant, derrière, ou à côté, de l'acteur. Ces deux métriques peuvent être exprimées en termes de produits scalaires.

L'évasion est analogue à la poursuite, sauf que la fuite est utilisée pour s'orienter loin de la future position prévue de l'acteur poursuivant.

4.1.3 Comportement d'arrivée

Le comportement d'arrivée est une extension du comportement de recherche. De même que pour le comportement de recherche, il est utilisé pour orienter le véhicule vers une cible indiquée. La différence importante se résume dans la manière selon laquelle le véhicule atteint la destination.

Le comportement de recherche fait que notre véhicule atteint la cible à pleine vitesse. Il se déplace en fait davantage dans la direction actuelle et va ainsi générer plutôt un mouvement de danse semblable au comportement d'une mite autour d'une source lumineuse. Cependant, le comportement d'arrivée doit être tel qu'il y ait un ralentissement commandé du véhicule conformément au cahier des charges édicté par l'utilisateur, le mouvement doit s'arrêter à la position désirée (figure 1.6).

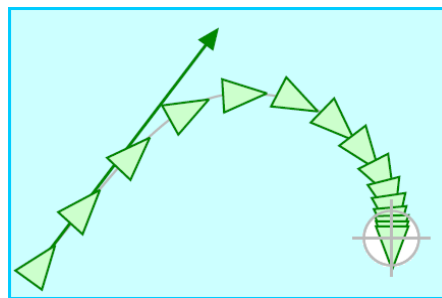


Figure 1.6 : le comportement d'arrivé (Reynolds, 1999).

Le calcul de la force de direction commence hors du rayon d'arrêt est de la même manière que dans les comportements de recherche. Le vecteur résultant est la différence entre la vitesse désirée et la vitesse actuelle, à l'intérieur du rayon d'arrêt, la force est calculée selon la distance à la cible divisée par le nombre désiré d'étapes. Ceci fait provoquer le ralentissement du véhicule selon sa distance actuelle à la destination et le résultat est un véhicule qui s'arrête au niveau de la cible indiquée. Des exemples de ce comportement, du monde réel, incluent un joueur de base-ball courant et puis s'arrêtant à une base, ou une automobile se déplaçant vers une intersection finissant par s'arrêter au niveau d'un arrêt ou d'un feu tricolore.

4.1.4 Comportement de poursuite excentrée

La poursuite excentrée consiste à orienter une voie d'accès qui passe près de la cible mobile, mais qui ne coïncide pas avec cette cible. Les exemples seraient faire le vol d'un vaisseau spatial, l'interception d'un avion par un chasseur : voler près de l'avion cible sans le heurter. L'idée fondamentale est de calculer dynamiquement un point de cible qui est compensé par un rayon R de la future position prévue par rapport à la cible, le principe de recherche prend désormais cette position (point excentré) comme nouvelle cible (figure 1.7).

4.1.5 Comportement d'évitement d'obstacles

Le comportement d'évitement d'obstacles donne à un acteur la capacité de manœuvrer dans un environnement encombré en esquivant autour des obstacles. Il y a une distinction importante entre l'évitement d'obstacles et le comportement de fuite.

La fuite a pour conséquence d'orienter l'acteur loin d'un emplacement donné, tandis que l'action d'évitement d'obstacles agit seulement quand un obstacle se trouve directement devant cet acteur. Par exemple, si une voiture se déplace sur une trajectoire parallèle à un mur, l'évitement d'obstacles ne prendrait aucune mesure corrective de direction, mais la fuite essaierait de s'éloigner du mur, en suivant la perpendiculaire à ce mur.

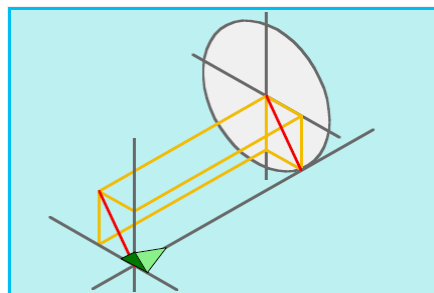


Figure 1.7 : le comportement de poursuite excentrée (Reynolds, 1999).

La mise en place du comportement d'évitement d'obstacles décrite ici fera une prétention de simplification que le caractère et l'obstacle peuvent être raisonnablement proches comme des sphères, bien que le concept de base puisse être facilement étendu à des modèles de forme plus précis. Cette méthodologie est plutôt adaptée à l'évitement d'obstacles et en aucun cas à la détection de collision. On pourrait schématiser par l'exemple d'un avion essayant d'éviter une montagne. Ni l'avion, ni la montagne ne sont sphériques, mais il suffirait que la sphère de bondissement de l'avion évite la sphère de bondissement de la montagne. Une hiérarchie décomposable des sphères de bondissement peut être utilisée pour la représentation efficace des sphères pour la détection de collision, et vraisemblablement pour l'action d'évitement d'obstacles également.

La construction géométrique du comportement d'évitement d'obstacles découvre une certaine similitude au comportement d'excentré de poursuite décrit ci-dessus. Il est commode de considérer la situation géométrique du système du rang local de l'acteur.

Le but du comportement est de garder un cylindre imaginaire de l'espace libre devant l'acteur. Le cylindre se trouve le long de l'axe vers l'avant l'acteur, à un diamètre égal à la sphère de bondissement de l'acteur, et s'étend du centre de l'acteur pour une distance basée sur la vitesse et l'agilité de l'acteur.

Le comportement d'évitement d'obstacles considère chaque obstacle alternativement et détermine si ces obstacles possèdent des intersections avec le cylindre. En localisant le centre de chaque obstacle sphérique, le test d'intersection avec le cylindre est ainsi effectué très rapidement.

Dans la figure 1.8, le cylindre indique les futures positions du caractère, A, B et C sont trois obstacles sphériques. On constate que les obstacles B et C intersectent le cylindre, l'obstacle B est choisi pour l'évitement puisqu'il est le plus proche. La direction corrective est dans le sens gauche du caractère.

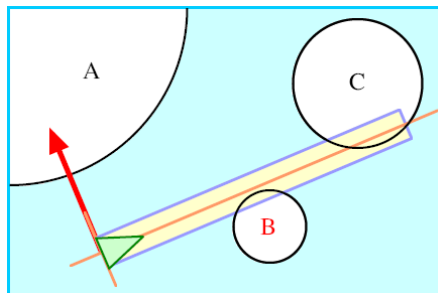


Figure 1.8 : l'évitement d'obstacle (Reynolds, 1999).

Une note finale concernant l'interaction d'évitement d'obstacles et de rechercher de but. D'une façon générale nous nous intéressons seulement aux obstacles qui sont localisés entre l'acteur et le but à atteindre (La montagne au delà de l'aéroport est ignorée par l'avion, mais la montagne entre l'avion et l'aéroport est très importante).

4.1.6 Comportement d'errance

Errer est un type de direction aléatoire. Une mise en œuvre facile devrait produire une force de direction aléatoire à chaque encadrement, mais cela produit un mouvement plutôt non intéressant. C'est une situation inconfortable qui ne permet de produire aucune tournure supportée. Une approche plus intéressante est de conserver l'état de la direction et d'y intégrer de petits déplacements aléatoires pour chaque encadrement.

Cette idée peut être mise en œuvre selon plusieurs voies, mais celle ayant produit de bons résultats doit contraindre la force de direction à la surface d'une sphère placée légèrement devant l'acteur. Pour produire la force de direction pour l'encadrement suivant : Un déplacement aléatoire est ajouté à la valeur précédente et la somme est contrainte de nouveau à la surface de la sphère (figure 1.9).

4.1.7 Comportement de suivi de chemin

Ce type de comportement permet à un acteur de s'orienter le long d'une voie d'accès prédéterminée, telle qu'une chaussée, un couloir ou un tunnel. C'est en fait très distinct de l'action de contraindre un véhicule à suivre d'une manière rigide une voie d'accès par exemple le roulement d'un train le long d'un rail. Le comportement de suivi d'une voie d'accès est plutôt destiné à la production de mouvements tels que des personnes empruntant un couloir : les différentes voies d'accès restent proches et sont souvent parallèles à l'axe du couloir, elles sont néanmoins libres. Dans le cadre de la mise en œuvre de cette idée, une voie d'accès sera schématisée par un couple (épine, rayon).

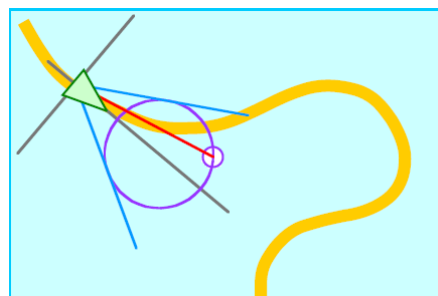


Figure 1.9 : le comportement d'errance (Reynolds, 1999).

L'épine pourrait être représentée comme courbe de cannelure (spline) ou bien par une série de segments de ligne reliés (poly-line). La voie d'accès est alors un 'tube' ou un 'cylindre généralisé' (un cercle du rayon calculé et balayant l'épine indiquée). Le but du comportement (suivant de direction de voie d'accès) est de déplacer ou de permettre à un acteur de se déplacer le long de la voie d'accès tout en restant dans le rayon indiqué de l'épine. Si l'acteur est au commencement loin de la voie d'accès, il doit d'abord se rapprocher et suivre ensuite la voie d'accès.

Pour calculer la direction de la voie d'accès suivante, une prévision de la future position de l'acteur est faite. Basée sur la vitesse, elle est réalisée de la même manière que celle adoptée pour l'évitement d'obstacle. La future position prévue est projetée sur le point le plus proche sur l'épine associée à la voie d'accès (figure 1.10). Si cette distance est inférieure au rayon de la voie d'accès, alors l'acteur est qualifié suivant la bonne voie d'accès, aucune direction corrective n'est alors exigée.

Autrement dit, l'acteur vire loin de la voie d'accès, ou en est trop loin de celle-ci. Pour l'orienter en arrière vers la voie d'accès, le comportement de recherche est exploité pour une orientation en arrière vers la projection de la voie d'accès de la future position prévue, de la même manière que pour l'action d'évitement.

4.1.8 Comportement de retenue

La figure 1.11 présente des variations de suivie de chemin inclut le suivi de mur et la retenue. La retenue se rapporte à un mouvement limité permettant de demeurer dans une certaine région. Le suivi d'une voie d'accès est un type de retenue où la région permise est un cylindre autour de l'épine de la voie d'accès. Nous pouvons citer quelques exemples tels que : nager dans un aquarium ou encore jouer au hockey sur glace dans une patinoire. Le principe de gestion se résume à la prévision de la future position de notre acteur : dans le cas où elle est à l'intérieur de la région permise alors aucune direction corrective n'est nécessaire.

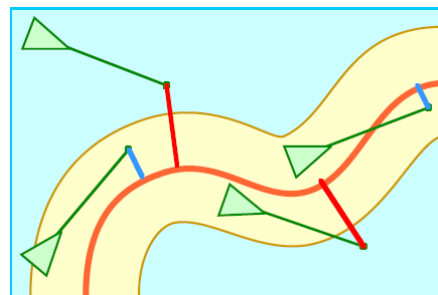


Figure 1.10 : le comportement de suivre de chemin (Reynolds, 1999).

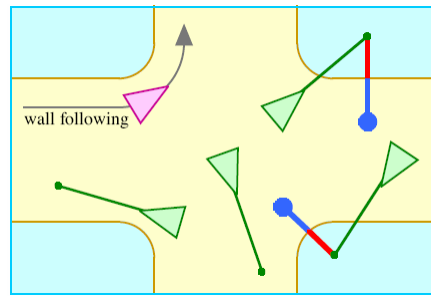


Figure 1.11 : le comportement de retenue (Reynolds, 1999).

Dans le cas contraire, l'acteur est orienté vers la région permise. Ceci peut être accompli en utilisant la recherche avec un point intérieur, ou encore en déterminant l'intersection de la voie d'accès avec la borne : la surface normale à ce point est ainsi déterminée, la composante extérieure de la normale qui est perpendiculaire à la direction actuelle est choisie comme direction transversale corrective vers l'avant.

4.1.9 Comportement de suivi d'un champ de flux

Le comportement de suivi d'un champ de flux fournit un outil pour diriger le mouvement de l'acteur en se basant sur sa position dans son environnement. Dans ce type de comportement de suivi de champ de flux, l'acteur se doit de se diriger tout en alignant son mouvement sur la tangente locale de champ de flux (aussi connu comme un champ de force ou un vecteur de champ). L'implémentation de suivi du champ de flux est très simple. La position future d'un caractère est estimée et le champ de flux est échantillonné à cet emplacement (figure 1.12). Cette direction de flux (vecteur F) est 'la vitesse désirable' et la direction de chemin (vecteur S) est simplement la différence entre la vitesse courante (vecteur V) et la vitesse désirable.

4.1.10 Evitement de collision non-alignée

Le comportement d'évitement de collision non alignée essaye de prévenir les collisions entre les acteurs qui se déplacent dans une direction arbitraire. Par exemple, considérez votre propre expérience de marche à pied à travers une place ou une entrée pleine d'autres

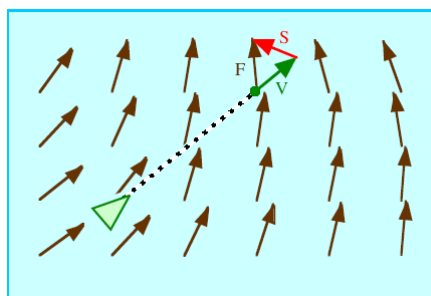


Figure 1.12 : le comportement de suivi de champ de flux (Reynolds, 1999).

marchants : l'évitement de collisions implique la prévision de collisions potentielles et le changement de votre direction et de votre vitesse pour les prévenir. Si tous les acteurs voisins sont alignés, une stratégie moins compliquée peut être employée, selon le processus de séparation (présenté ci-dessous dans la figure 1.15).

Il y'a lieu de mettre en œuvre cela comme un comportement de direction. Notre acteur considère chacun des autres acteurs et détermine, selon les vitesses actuelles, quand et avec quel autre acteur il fera la plus proche approche. Ainsi, une collision potentielle existe si la distance entre les deux acteurs est assez petite (indiqué dans la figure 1.13 par des cercles). Une fois ce potentiel déterminé, l'acteur se dirige alors dans une direction lui permettant d'éviter l'emplacement prévu pour la collision potentielle.

Différents palliatifs sont, par ailleurs envisageables : il se dirigera latéralement pour se détourner de la collision potentielle, il accélérera aussi en avant où ralentira en arrière pour arriver à l'emplacement indiqué en avance ou en retard par rapport à la collision prévue. Dans la figure 1.13 l'acteur s'approchant de l'endroit prévu pour la collision, se décide de ralentir et de tourner à gauche, tandis que l'autre caractère accélérera et tournera à gauche.

4.2 Le comportement de groupes

Dans son approche de simulation de comportements de groupes, Reynolds simule les nuées d'oiseaux, les troupes d'animaux et les bancs de poissons (Reynolds, 1987). Un groupe est l'élaboration d'un système de particules avec acteurs (oiseaux ou poissons) en tant que particules. Un groupe est supposé le résultat de l'interaction entre les comportements individuels des acteurs. De façon individuelle, les acteurs tentent de rester ensemble et d'éviter les collisions avec les autres acteurs d'une part et les objets aux alentours d'autre part. Les positions, les vitesses et les différentes orientations des acteurs sont connues dans le système à tout instant. L'animateur peut contrôler plusieurs paramètres globaux tel que :

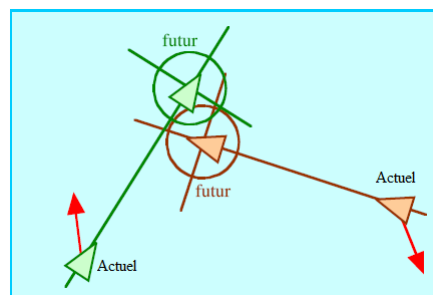


Figure 1.13 : le comportement d'évitement de collision non-alignée (Reynolds, 1999).

- Le poids du composant d'évitement d'obstacles.
- Le poids de la convergence vers le but.
- Le point du centrage du groupe.
- Le poids de l'égalité des vitesses.
- La vitesse maximale.
- L'accélération maximale.
- La distance minimale entre les oiseaux.

Les trois comportements de direction (séparation, cohésion et l'alignement) touchent des groupes d'acteurs. Dans chaque cas, le comportement de direction détermine comment un acteur réagit à d'autres dans son voisinage local. Les acteurs à l'extérieur du voisinage local sont ignorés.

Le voisinage est spécifié par une distance qui est défini quand deux acteurs sont 'voisin' et un angle qui définit la perception de l'acteur 'champ de voisin' (figure 1.14).

4.2.1 La séparation

Le comportement de séparation donne à l'acteur la capacité de maintenir une certaine distance de séparation des autres caractères qui sont proches de lui. Cela peut être employé pour empêcher les acteurs de s'entasser ensemble. Pour calculer la direction de séparation, d'abord une recherche est faite pour trouver d'autres acteurs dans le voisinage indiqué. Pour chaque acteur voisin, la force répulsive est calculée en soustrayant les positions de notre acteur et l'acteur voisin, ensuite la normalisation de l'application à $1/r$ indemnité (c'est-à-dire la position compense le vecteur est mesuré par $1/r^2$). Notons que $1/r$ est juste un arrangement et pas une valeur fondamentale.

Les forces répulsives pour chaque acteur voisin sont additionnées ensemble pour produire la force de direction (figure 1.15).

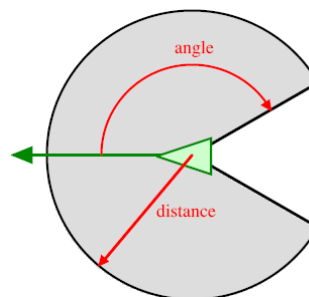


Figure 1.14 : notion de voisinage (Reynolds, 1999).

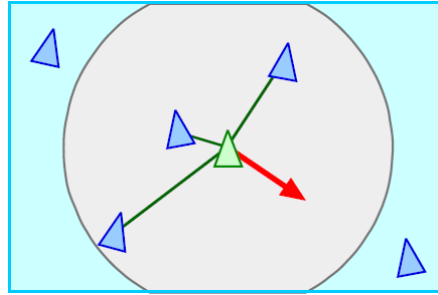


Figure 1.15 : le comportement de séparation (Reynolds, 1999).

4.2.2 La cohésion

Le comportement de cohésion donne aux acteurs la capacité de générer une situation de cohérence dans le groupe qu'ils forment (se rapprocher et former un groupe) avec d'autres acteurs voisins (figure 1.16).

La direction de la cohésion peut être calculée en déterminant tous les acteurs dans le voisinage local (comme décrit plus haut pour la séparation) et en calculant 'la position moyenne' (ou centre de gravité) des acteurs voisins.

La direction de la force peut ainsi être appliquée dans la direction de 'la position moyenne'.

4.2.3 L'alignement

Le comportement d'alignement donne à l'acteur la capacité de s'aligner sur d'autres acteurs voisins (figure 1.17). La direction d'alignement peut être calculée en déterminant tous les acteurs dans le voisinage local (comme décrit précédemment pour la séparation), en faisant la moyenne des ensembles des vitesses des acteurs voisins.

Cette moyenne est 'la vitesse désirable', ainsi le vecteur de direction est la différence entre la moyenne et la vitesse courante de notre acteur. Cette direction a tendance à faire tourner notre acteur, il est ainsi aligné sur ses voisins.

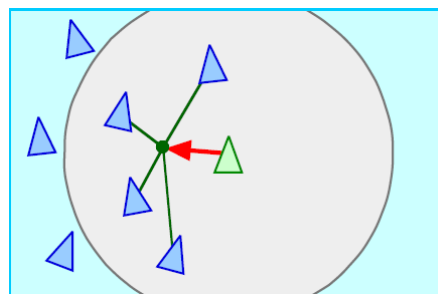


Figure 1.16 : le comportement de cohésion (Reynolds, 1999).

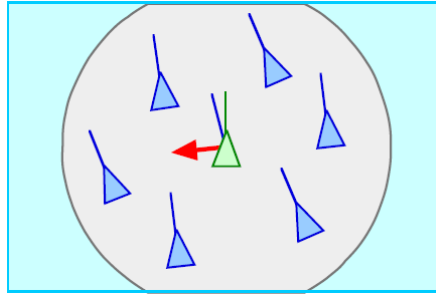


Figure 1.17 : le comportement d'alignement (Reynolds, 1999).

4.2.4 Le suivi de chef

Le comportement de suivi de chef est provoqué par un ou plusieurs acteurs à l'effet de suivre un autre acteur en mouvement et considéré comme le chef. Généralement, ces acteurs tentent de rester près du chef, sans la cohue et faisant attention à rester loin de la voie du chef (dans le cas où ils arrivent à trouver des disciples devant le chef). De plus, s'il y a plus d'un disciple, ils doivent éviter de le heurter (figure 1.18).

4.3 Combinaison de comportements

Les différents comportements de direction décrits ci-dessus peuvent servir de modules à des modes de comportement plus complexes. Ainsi, des comportements plus complexes et plus en rapport avec la réalité peut être construit à l'aide de comportements élémentaires.

La combinaison des comportements peut être réalisée de deux manières. Un acteur peut séquentiellement commuter entre les modes comportementaux pendant que les circonstances changent en son monde (Blumberg et al., 2002). Par ailleurs, quelques types de comportements sont généralement mélangés ensemble, agissant efficacement en parallèle (par exemple évasion et évitement d'obstacles). Ainsi, les comportements sont calculés individuellement et sont ensuite additionnés tout en utilisant un facteur de pondération pour chacun des comportements et ce en fonction de l'effet que l'on veut reproduire.

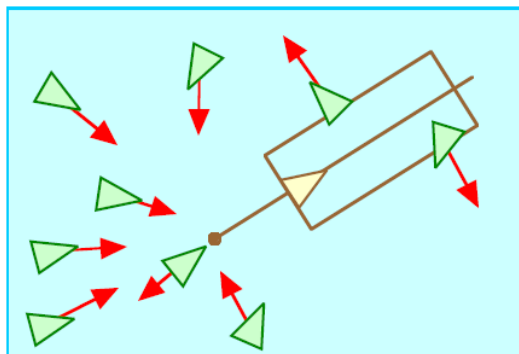


Figure 1.18 : le comportement de suivi de chef (Reynolds, 1999).

Cette combinaison linéaire simple fonctionne souvent bien, mais présente parfois quelques imperfections. La détermination des poids à affecter aux comportements élémentaires ne génère pas toujours un comportement complexe toujours rationnel ou réaliste, ceci sans citer les problèmes de complexité liés au calcul proprement dit, la charge de calcul étant généralement élevée. Cette charge de calcul peut être diminuée en observant l'élan d'un acteur en appliquant un filtre passe-bas aux changements de la force de direction. Ainsi, plutôt que de calculer plusieurs composantes de direction à chaque étape de la simulation et d'en calculer la moyenne, nous pourrions séparer le composant objet du changement pour laquelle un calcul effectif est effectué et reproduire ensuite le mélange des mouvements élémentaires pour obtenir le mouvement composé. Par ailleurs, des priorités peuvent également être assignées aux mouvements élémentaires entrant dans la reproduction du mouvement composé (par exemple : la première priorité est action d'éviter d'obstacle, en second lieu l'évasion...) (Reynolds, 1999).

5 Conclusion

Dans ce chapitre introductif, nous avons présenté les caractéristiques générales du paradigme agent en définissant la terminologie et une typologie possible des agents, avant de nous intéresser plus précisément au comportement et à l'aspect autonomie attribué aux agents. Nous avons expliqué précisément la structure du modèle de comportement et comment un agent virtuel autonome peut agir dans son univers, c'est à dire quel rôle il joue et quelles organisations il peut former ou intégrer. Nous avons, ainsi, présenté une collection de comportements simples et communs de déplacement (La recherche, l'évasion, la poursuite, l'arrivée, l'évitement d'obstacles, l'évitement de collisions, l'errance, la retenue, la cohésion,...). Nous terminons en présentant quelques techniques pour la génération de mouvement plus complexes à partir de comportements simples ou élémentaires.

Chapitre 2

Piéton virtuel

1	Introduction	33
2	Définitions	33
3	Classification des travaux de recherche sur les piétons.....	34
4	Les approches microscopique et macroscopique.....	36
5	Observation du comportement des piétons.....	42
6	Le comportement de navigation piétonnier	45
7	Conclusion.....	48

1 Introduction

La création des personnages virtuels est un thème de recherche appartenant au domaine de l'animation comportementale, nous avons présenté ce domaine dans le chapitre précédent. Ici nous nous intéressons aux simulations des humains virtuels qui deviennent de plus en plus importantes dans différents domaines tel que l'industrie de divertissement et dans la simulation de secours. Elles peuvent être employées pour simuler la présence de vrais humains. Une telle technologie peut être employée dans des situations très dangereuses pour que des personnes réelles ne soient pas les vrais acteurs.

Dans notre travail nous nous intéressons plus précisément à un environnement virtuel peuplé par une foule des piétons. Cette dernière est définie par un ensemble de groupes, où chaque groupe est constitué de plusieurs piétons. Donc ce chapitre est consacré à la présentation de piéton virtuel, nous présentons une classification des travaux de recherche sur les piétons, nous décrivons en détails les modèles microscopiques et macroscopiques utilisés pour la simulation des piétons, nous observons aussi les comportements du piéton et nous terminerons par le comportement de navigation piétonnier.

2 Définitions

On considère les définitions des trois entités suivantes :

- *Individu* : un individu (ci-après dénommer simplement un agent ou un piéton) est un humanoïde dont les comportements sont inspirés par ceux de l'homme (Musse, 2000).
- *Groupe* : d'après une définition du dictionnaire 'le petit Robert' : « Le groupe est un ensemble d'individus ayant quelque chose en commun indépendamment de leur présence au même endroit ». Un groupe d'agents est un ensemble d'agents réunis ou ayant été réunis par le concepteur ou l'utilisateur pour effectuer des tâches communes. Ce groupe est capable de s'organiser en s'adaptant aux circonstances et aux situations rencontrées dans l'environnement, de manière à être plus performant qu'un groupe non organisé (Lauri, 2000).
- *Foule* : en anglais, le terme 'crowd' peut être utilisé en tant que nom ou verbe. Malheureusement, il n'y a pas de traduction française pour la forme verbale du mot. La meilleure traduction est 'atroupement' et ne reflète pas exactement la définition anglaise du mot. 'Crowd' et 'crowding' sont deux champs de

recherche différents et indépendants. La foule peut être définie comme étant un rassemblement d'un grand nombre de personnes dans un même endroit. Mais, la forme verbale du mot anglais 'crowd' a une signification plus nébuleuse. 'Crowding' est définie comme étant trop de monde dans pas assez de place (Pelletier, 2003). Ici dans notre travail une foule des piétons est composée de plusieurs groupes et chaque groupe est composé d'un seul ou un ensemble d'individus.

On peut résumer les définitions des trois entités précédentes dans la figure 2.1.

3 Classification des travaux de recherche sur les piétons

Teknomo a proposé, dans sa thèse portant sur l'acquisition par traitement d'images et la modélisation de mouvements de piétons, une classification des travaux disponibles fin 2001 sur l'étude et la modélisation de piétons (Teknomo, 2002).

Il a établi une première distinction entre la collecte d'informations sur les piétons (data collection), et sur les tentatives d'analyse des comportements des piétons (analysis), l'illustration est montré dans la figure 2.2.

La modélisation et la simulation du comportement des piétons figurent dans la partie analyse. Mais ces deux catégories ne sont pas disjointes, puisque certains paramètres utilisés dans les modèles peuvent être obtenus à partir d'études descriptives.

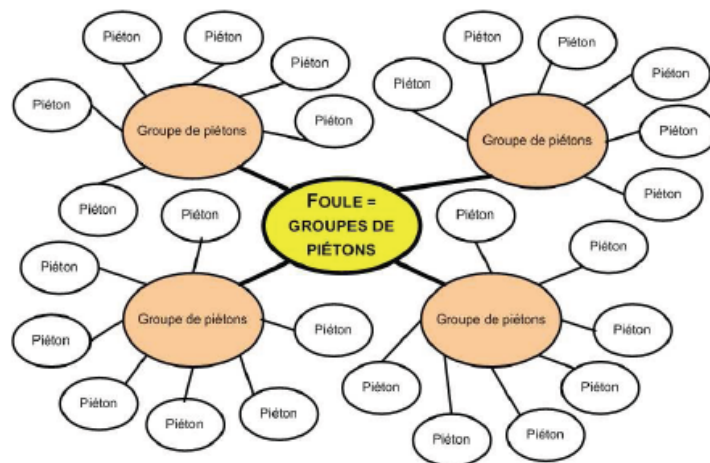


Figure 2.1 : Les trois échelles d'observation des piétons (Wakim, 2005).

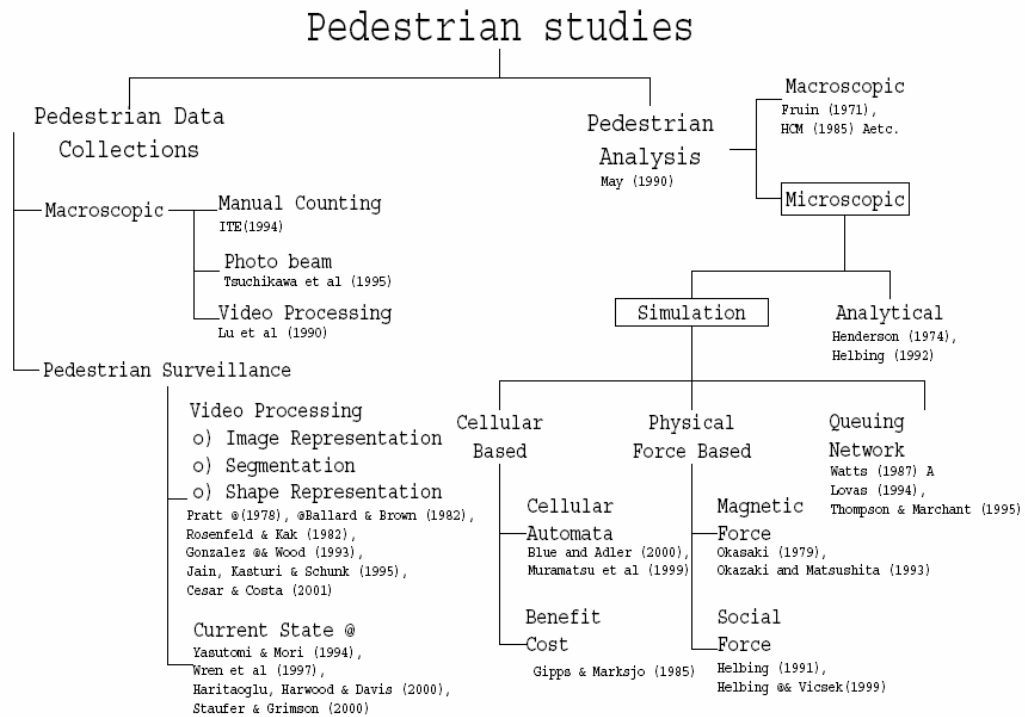


Figure 2.2 : Classification des modèles de piétons (Teknomo, 2002).

L'origine des informations sur les piétons est variée (Wakim, 2005):

- Certaines consistent en de simples observations sur certaines situations de la vie courante.
- Un autre mode d'observation des piétons consiste à réaliser des mesures (automatisées ou manuelles), en conditions réelles, par exemple sur passage protégé avec feux, ou dans une configuration plus particulière, dans un hall, sur un terrain de sport...etc, de caractéristiques physiques des piétons (Fugger Jr et al., 2001). La trajectoire empruntée, la vitesse, l'accélération ou une analyse détaillée de la démarche ou de la foulée, ont fait l'objet de plusieurs travaux, souvent par des spécialistes en médecine sportive, parfois pour de l'animation d'humanoïdes de synthèse (cinéma, jeux vidéo...). Ces études sont effectuées « en direct », ou en différé sur un enregistrement vidéo des scènes (Randles et al., 2001; Silcock et al., 1998). Dans ce dernier cas, les informations sont plutôt de nature quantitative.
- Enfin, pour essayer de comprendre le comportement des piétons, des sondages et autres études orientées vers la psychologie et la sociologie, ayant pour objet l'analyse des relations entre piétons (Silcock et al., 1998), sont menées pour comprendre le comportement des piétons et leur perception du risque. Les informations sont alors qualitatives.

4 Les approches microscopique et macroscopique

Teknomo opère une séparation entre les études sur les piétons de type ‘macroscopique’ et celles qui s’orientent vers une approche ‘microscopique’ (Teknomo, 2002). Selon ces termes :

- l’approche macroscopique consiste à agréger les mouvements des piétons et à s’intéresser à des flux de déplacement, à une foule de piétons. Ces mouvements peuvent être décrits par des équations analogues à celles de la mécanique des fluides (Hanisch et al., 2003).
- au niveau microscopique, chaque piéton est considéré comme un individu et traité comme une entité à part entière.

Certains chercheurs introduisent même un niveau intermédiaire qualifié de ‘mésoscopique’. L’approche mésoscopique consiste à ne pas traiter tous les piétons comme faisant partie d’un seul flux, mais à agréger les piétons en groupes homogènes puis à les traiter (Wakim, 2005).

4.1 Modèles macroscopiques

La simulation macroscopique a été historiquement la première approche utilisée pour modéliser les mouvements de personnes, elle est caractérisée par son faible coût de calcul. (Donikian, 2004). La concentration principale de cette approche est le traitement de foule dans sa totalité, elle ne considère pas l’interaction entre les personnes, et elle n’est pas convenable pour la prédiction de performance de flux des piétons dans une région ou un immeuble avec des garnitures (téléphone, chaise, table ...etc), par contre l’approche microscopique traite chaque humain de façon isolé et mesure son comportement d’interaction avec des autres personnes.

4.1.1 Modèles de régression

Les modèles de régression utilisent statistiquement les relations établies entre les variables de flux pour prévoir les opérations de flux de piétons dans des circonstances particulières. Les caractéristiques de ce flux dépendent de l’infrastructure (escaliers, couloirs, ...etc) (Milazzo et al., 1998).

4.1.2 Modèles de choix d'itinéraire

Les modèles de choix d'itinéraire décrivent l'orientation des piétons à base de concept d'utilité. Les piétons choisissent leurs destinations pour maximiser l'utilité de leur parcours (confort, temps de déplacement, ... etc) (Hoogendoorn, 2003).

4.1.3 Modèles de queue

Les modèles de queue utilisent les modèles de chaîne de Markov (Lovas, 1994) pour décrire comment les piétons se déplacent d'un noeud du réseau à un autre. Les noeuds sont généralement des places (des salles), et les liens sont généralement des portails ou des portes. Les chaînes de Markov sont définies par un ensemble d'états avec des probabilités de transition. À chaque étape d'extrapolation, un état de successeur est choisi soit par échantillonnage de la distribution de transition ou l'identification du successeur le plus probable. Les probabilités de transition sont estimées à partir de la fréquence relative des transitions entre les prototypes de comportement observés dans les données de formation, prendre le prototype le plus proche de comportement à chaque instant. Seulement des transitions causant le changement d'état sont considérées (Pelechano et al., 2008).

4.1.4 Modèles de cinétique de gaz

Les modèles de cinétiques de gaz utilisent une analogie avec la dynamique de fluide ou de gaz pour décrire comment la densité et la vitesse de foule changent avec le temps en utilisant des équations aux dérivées partielles (Henderson, 1971).

4.2 Modèles microscopiques

Les méthodes microscopiques ne peuvent pas remplacer les méthodes macroscopiques, mais elles sont considérées comme une analyse plus détaillée pour la conception et l'interaction de piéton considérant que des caractéristiques individuelles et des facteurs psychologiques et sociologiques.

4.2.1 Modèle de force sociale

Le modèle de force sociale est une approche microscopique pour simuler le mouvement des piétons. Donner des forces sociales 'virtuelles' analogue aux forces réelles tel que les interactions répulsives, les forces de frottement, fluctuations. Il résout les équations de Newton de mouvement pour chaque individu. Ce modèle peut être avec succès appliqué pour simuler des scénarios réels de mouvement des piétons.

Par rapport à d'autres modèles, les modèles de force sociale décrivent le comportement des piétons de façon plus réaliste. Cependant, ils sont conçus pour être aussi simples autant possible, chaque agent est représenté dans le plan locomotion par un cercle avec son propre diamètre, le modèle décrit des coordonnées continues, des vitesses, et les interactions avec d'autres objets. Chaque paramètre de force a une interprétation naturelle individuelle pour chaque piéton, il est souvent choisi aléatoirement dans certains intervalles trouvés empiriquement ou dans des intervalles plausibles.

Le modèle empirique le plus important des modèles de force social est le modèle Helbing (Pelechano et al., 2008; Pelechano, 2006).

Modèle de Helbing : chaque piéton $1 \leq i \leq N$ de masse m_i peut atteindre une vitesse prédéfinie v_i^0 dans une direction e_i^0 , il tend à adopter sa vitesse instantané v_i dans un certain intervalle de temps τ_i , en même temps les individus essaient à garder une certaine distance des autres entités j et des murs w , cette distance est exprimée par des forces d'interactions respectivement f_{ij} et f_{iw} , alors le changement de vitesse en temps t est donné par l'équation d'accélération suivante :

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_w f_{iw}$$

Le changement de position $r_i(t)$ est donné par la vitesse $v_i(t) = \frac{dr_i}{dt}$. La tendance psychologique des deux piétons i et j pour que chacun reste loin de l'autre est décrit par une force d'interaction répulsive $A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i]n_{ij}$, où A_i et B_i sont des constantes, $d_{ij} = \|r_i - r_j\|$ est la distance entre les centres de masse de personnes, et $n_{ij} = (n_{ij}^1, n_{ij}^2) = (r_i - r_j)/d_{ij}$ est un vecteur normalisé qui pointe de l'agent j vers l'agent i .

Le piéton i touche le piéton j si la distance d_{ij} est plus petite que la somme $r_{ij} = (r_i + r_j)$ de leurs diamètres. Dans ce cas, deux forces supplémentaires inspirées par des interactions granuleuses qui sont essentielles pour comprendre les effets particuliers de panique : une «force du corps» $k(r_{ij} - d_{ij})n_{ij}$ parer à la compression du corps et une «force du frottement glissante» $\kappa(r_{ij} - d_{ij})\Delta v t_{ij} t_{ij}$ qui empêche le mouvement tangentiel relatif, si l'agent i vient près de j . Ici $t_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$ indique la direction tangentielle et $\Delta v t_{ij} = (v_j - v_i) t_{ij}$ indique

la différence de la vitesse tangentielle, tandis que k et κ représentent des constantes suffisamment grandes. Alors, on conclut :

$$f_{ij} = \left\{ A_i e^{(r_{ij}-d_{ij})/B_i} + kg(r_{ij}-d_{ij}) \right\} n_{ij} + kg(r_{ij}-d_{ij}) \Delta v_{ji}^t t_{ij}$$

Où la fonction $g(x) = x$ si les piétons se touchent ($d_{ij} < r_{ij}$), sinon elle est égale à zéro.

L'interaction avec les murs est traitée d'une manière analogue, elle est donnée par l'équation suivante :

$$f_{iw} = \left\{ A_i e^{(r_{ij}-d_{iw})/B_i} + kg(r_{ij}-d_{iw}) \right\} n_{iw} - kg(r_{ij}-d_{iw}) (v_i \cdot t_{iw}) t_{iw}$$

Où :

- d_{iw} signifie la distance entre le centre de piéton et la surface du mur w ,
- n_{iw} est la direction normale,
- t_{iw} est la direction tangentielle. (Pelechano *et al.*, 2008)

4.2.2 Modèle d'automates cellulaires

Les automates cellulaires sont des systèmes dynamiques discrets dont le comportement est complètement spécifié quant à une relation locale, il est caractérisé par les traits suivants (Dijkstra *et al.*, 2000) :

- La cellule : est l'élément de base, chaque cellule peut être dans un ensemble fini d'états possibles. Par exemple, les états pourraient représenter des attitudes, des caractéristiques individuelles, ou des actions. Un état pourrait aussi être vu comme une propriété ou une variable interne.
- La grille : les cellules sont arrangées dans une grille régulière. La grille est habituellement en forme d'une ligne de cellules en 1-dimension, un tableau rectangulaire en 2-dimension, ou un réseau en 3-dimension (cube).
- L'état : l'état d'une cellule à n'importe quel pas de temps est déterminé par un ensemble de règles conformément au principe d'homogénéité. L'homogénéité veut dire que chaque cellule est mise à jour en accordant aux mêmes règles. L'ensemble de règles spécifie comment l'état dépend de l'état antérieur de cette cellule et les états de cellules voisines.

- Le temps : l'évolution du temps à travers la simulation est gouvernée par les pas discrets et par les règles de la mise à jour selon les principes de parallélisme et de localité. Le parallélisme signifie que les mises à jour individuelles de la cellule sont exécutées indépendamment l'une de l'autre. La localité veut dire que lorsque une cellule est mise à jour, son état à $t+1$ est une fonction de son propre état et des états de ses voisinages à l'instant t .

L'automate cellulaire est défini par les quatre propriétés (L,S,N,f) mentionnées dans le tableau (2.1).

Définition	Description
L	une grille discrète régulière de cellules
$t \rightarrow t+1$	l'évolution prend en compte les pas du temps discret
S	ensemble fini d'états
$f: S^n \rightarrow S$	Chaque cellule évolue selon la même règle (fonction de transition) qui dépend uniquement de l'état de la cellule, et de nombre fini de cellules voisines
$N: \forall c \in N, \forall r \in L: r+c \in L$	La relation de voisinage est locale et uniforme

Tableau 2.1 : définition d'automate cellulaire.

Une configuration $C_t: L \rightarrow S$ est une fonction qui associe un état à chaque cellule de la grille. La fonction de la mise à jour f change une configuration C_t à une nouvelle configuration C_{t+1} :

$$C_{t+1}(r) = f(\{C_t(i) | i \in N(r)\})$$

Où $N(r)$ est l'ensemble de voisins de la cellule r , $N(r) = \{i \in L | r - i \in N\}$ (Pelechano *et al.*, 2008).

4.2.3 Le modèle à base de règles

Les modèles à base de règles (Reynolds, 1999; Reynolds, 1987) réalisent un mouvement humain plus réaliste pour les foules de faible et de moyenne densité dans un modèle de flocage ou de grouillement, mais ne gère pas les contacts entre les individus. Ces modèles adoptent habituellement une approche prudente en évitant le contact et quand les densités sont hautes, ils appliquent les règles 'attente' pour imposer à commandé le comportement de foule sans nécessité de calculer la détection et la réponse de collision. Les modèles

cognitifs ont été utilisés en combinaison avec des modèles à base de règles pour réaliser des comportements plus réalistes pour la simulation des piétons (Shao et Terzopoulos, 2005). Différentes règles comportementales peuvent être appliquées à la foule, au groupe, ou aux individus pour réaliser un comportement de foule global plus crédible (Thalman et al., 1999; O'Sullivan et al., 2002).

L'ensemble le plus connu des règles locales pour simuler le comportement complexe réaliste est le modèle de 'boids' de Reynolds (1987). Il s'agit d'une élaboration d'un système de particules avec les entités simulées 'boids' représentés sous forme de particules orientées avec des règles de contrôle spécifiques. Le mouvement global du troupeau simulé est créé par un modèle comportemental distribué. Chaque agent simulé est implémenté comme un acteur indépendant qui navigue en fonction de sa perception locale de l'environnement dynamique, les lois de la physique qui ordonnent son mouvement et un ensemble de comportements programmés par l'animateur. Le mouvement global du troupeau simulé est le résultat des plusieurs interactions des comportements simples des individus 'boids' simulés.

Le modèle de base pour simuler le comportement générique de flocage se compose de trois règles simples :

- La séparation afin d'éviter d'éventuelles collisions avec les voisins ;
- L'alignement afin de réguler sa vitesse sur celle de ces voisins ;
- La cohésion afin de rester proche de ses voisins.

Chaque 'boid' a accès à la description entière de l'environnement, mais le flocage exige seulement la réaction dans un voisinage spécifique qui est donné par une distance (du centre de chaque 'boid') et un angle (pour chaque direction de vol du 'boid'). On peut considérer ce voisinage comme un champ perceptif limité. Chaque 'boid' évitera non seulement la collision avec d'autres 'boids' mais également avec des obstacles dans l'environnement.

En plus des trois règles de base employées pour simuler le flocage (Reynolds, 1999) Reynolds a présenté un concept plus général des comportements de direction et il a placé le flocage dans ce contexte. Les comportements de direction améliorent les comportements déjà présentés dans le modèle original de 'boids' par la construction des systèmes autonomes complexes. Chacune de ces nouvelles règles définit seulement une réaction spécifique sur l'environnement simulé du système autonome (Pelechano *et al.*, 2008).

Les comportements simples pour les individus et les couples :

- Comportement de recherche et de fuite;
- Comportement de poursuite et évasion;
- Comportement d'arrivée;
- Comportement de poursuite excentrée;
- Comportement d'évitement d'obstacles;
- Comportement d'errance;
- Comportement de retenue;
- Comportement de suivi d'un champ de flux;

Combinaison des comportements et le comportement de groupes :

- Comportement de suivi de chemin;
- Le suivi de chef;
- Evitement de collision non-alignée;

5 Observation du comportement des piétons

5.1 Environnement

L'environnement tient un rôle capital dans la plupart des systèmes de simulation d'agent virtuels, il n'est pas possible de construire des agents sans prendre en compte leur environnement, ni les relations qui existent entre eux. Que serait un environnement sans agent et des agents sans environnement ?

D'une manière générale, un environnement est un espace, muni d'une topologie ou non, possédant des objets passifs ou actifs, et des lois d'interactions entre lui-même et ses objets. La caractéristique principale d'un environnement est son aspect situé ou non. Un environnement est situé s'il est constitué à partir d'un espace possédant une métrique, et dans lequel les objets et les agents ont une position en termes de coordonnées. Il n'est pas situé si la notion d'espace et de positionnement dans l'espace n'est pas présentée. Les systèmes classiques à base de règles peuvent être considérés comme des environnements non-situés où les objets les constituant, les règles, ne sont pas considérés comme des entités ayant un paramètre de positionnement et évoluant dans un espace.

Les systèmes multi-agents sont développés généralement avec des environnements situés. Ceux-ci peuvent être à nouveau divisés en deux sous-ensembles. La seconde caractéristique est la continuité de l'environnement, distinguant alors les environnements continus des environnements discrets (Lattaud, 1998) :

- Un environnement est continu si, quels que soient deux points de cet environnement, il existe au moins un point entre eux. Même si d'un point de vue informatique, la notion de continuité stricte est actuellement impossible, un environnement continu peut être construit en utilisant une métrique basée sur un système vectoriel de nombres réels.
- Un environnement est discret s'il est découpé en cases, carrées ou hexagonales par exemple. La métrique est donc basée sur les nombres entiers, les agents ne peuvent alors plus se déplacer en fonction de vecteurs de nombres réels mais en fonction de valeurs discrètes entières.

5.2 Interactions avec l'environnement

En temps normal, lors de ses déplacements que ce soit dans un bâtiment ou à l'extérieur, le piéton fait sans cesse appel à ses sens, et en particulier à la vue pour s'orienter et adapter sa trajectoire (Patla, 1997). Un piéton surveille son environnement de façon permanente et naturelle. La zone balayée prend la forme d'une ellipse dont les dimensions s'adaptent aux conditions de trafic et aux obstacles (Hoogendoorn, 2004).

Pour se déplacer, un piéton requiert un minimum d'espace (Hoogendoorn, 2004) :

- un pas mesure environ 0,65 m,
- il avance de 2,05 pas/s pour une vitesse moyenne de 1,33 m/s.
- la distance avec le prédécesseur est d'au moins 1 m.

Le besoin d'espace se manifeste pour l'environnement longitudinal du piéton, c'est-à-dire devant lui, et dans son voisinage latéral. Les piétons qui se déplacent sur un trottoir observent une distance de confort ou de sécurité vis-à-vis :

- des murs et petits obstacles : 0,25 m,
- des maisons et obstacles de plus grandes dimensions : 0,45 m,
- et des routes : 0,35 m.

La distance entre les piétons diminue quand la densité augmente. La vitesse, l'espace vital et la longueur des pas diminuent aussi. L'espace vital d'un piéton immobile est de $0,15 \text{ m}^2$, soit une densité maximale de 6,6 piétons immobiles par m^2 . Lorsque la densité de piétons vaut 5,4 piétons par m^2 , il n'y a plus de place pour marcher.

L'évitement entre les piétons se fait le plus souvent au dernier moment en effectuant un pas latéral. Dans ce cas, les piétons ont tendance à se décaler à droite. Cependant, les piétons semblent réticents à céder le passage unilatéralement à un autre piéton (Hoogendoorn, 2004). Lorsque des piétons se retrouvent à proximité, il y a une coopération entre eux pour éviter les collisions. Cette coopération prend la forme du protocole suivant (Wakim, 2005):

- émission de signe critique,
- reconnaissance et acquittement,
- interaction.

5.3 Déplacements des piétons

En moyenne, la trajectoire d'un piéton qui traverse la route sur un passage piéton sera plutôt perpendiculaire à la route, alors qu'un piéton qui traverse hors d'un passage piéton aura tendance à arrondir les angles et à prendre la diagonale (figure 2.3).

Les différentes phases d'une traversée de route sont typiquement :

- « démarrage » en descendant du trottoir ou au début d'une nouvelle voie, avec augmentation de la vitesse jusqu'à atteinte de la vitesse voulue.
- maintien de la vitesse de croisière.
- éventuellement, avant de traverser une nouvelle voie véhicule : accélération, ralentissement, ou changement de direction doux.
- « fin de traversée » : léger ralentissement, changement de direction.

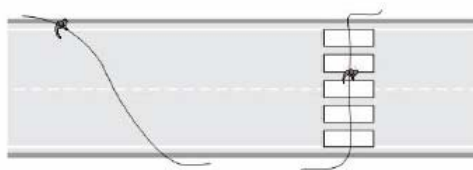


Figure 2. 3 : Trajectoires de piétons traversant une route, hors et sur passage piéton (Wakim, 2005).

Un piéton se déplace en adoptant une des trois allures suivantes : marche, course lente (jogging en anglais) ou course rapide (running en anglais).

Pour piloter son déplacement, le piéton a la possibilité d'agir sur les éléments suivants (Wakim, 2005) :

- le piéton marche, « normalement », vers l'avant (déplacement longitudinal). Il joue sur : la longueur des pas, leur cadence et/ou la direction suivie,
- d'autres déplacements sont envisageables : les pas sur le côté, l'arrêt, ou la marche arrière.

6 Le comportement de navigation piétonnier

6.1 Représentation mentale de l'environnement de navigation

Avant même de pouvoir se déplacer dans son environnement, l'être humain a besoin de se le représenter. Cette représentation mentale va en effet lui servir à raisonner sur cet environnement, que ce soit pour évaluer un chemin afin d'atteindre une localisation précise, ou encore pour organiser les tâches qu'il doit effectuer (comme les interactions avec des objets). C'est à la représentation mentale permettant le premier type de raisonnement – la navigation – que nous allons nous attacher ici.

Cette représentation mentale, dite topologique, permet à un être humain de se repérer dans l'environnement. Elle passe par une phase d'abstraction, c'est-à-dire une interprétation personnelle de la géométrie des lieux. Une telle abstraction, dénommée carte cognitive spatiale, est basée sur deux concepts. Premièrement, l'élaboration d'une carte sous-entend une construction mentale durable, faisant intervenir des processus mémoriels permettant une conservation de l'information au cours du temps. Deuxièmement, le recours à un mécanisme cognitif signifie que cette représentation est obtenue par un procédé actif, réfléchi, de l'être humain, celui-ci raisonnant sur ce qu'il perçoit de son environnement pour l'organiser (Paris, 2007).

L'abstraction mentale d'un environnement peut être vue comme un système de filtrage, où l'être humain ne va pas stocker l'ensemble de la géographie perçue, mais plutôt en extraire des lieux marquants. Ces zones d'intérêt sont des endroits dont la localisation est mieux connue, et serviront ensuite de point de repère à d'autres lieux adjacents. Waller et al. (2002) indiquent que ces lieux marquant, une fois associés entre eux, forment une mémoire spatiale impliquée dans plusieurs tâches mentales. Néanmoins, Wender et al. (2003)

signalent que la mémoire spatiale ne se résume pas à la simple association de lieux marquants. Par l'intermédiaire d'expériences, ils montrent que la construction d'une carte cognitive spatiale ne se fait pas en une seule étape, mais est un phénomène redondant au cours du temps. Tout d'abord l'être humain extrait des lieux marquants, puis des chemins, et enfin une organisation topographique des lieux. Ensuite, il est capable de se rappeler d'un chemin en se servant de cette carte cognitive spatiale, grâce à un mécanisme de rappel depuis la mémoire. Celui-ci est dépendant du contexte comportemental et environnemental de l'individu (Paris, 2007).

6.2 Processus mentaux de navigation

Une fois que l'être humain dispose d'une représentation mentale de son environnement, il peut l'exploiter afin d'organiser son déplacement. Ces processus mentaux sont scindés en trois groupes principaux :

- a) Raisonnement spatial, où l'individu va associer les tâches qu'il doit effectuer avec leur localisation, puis procéder à une sélection.
- b) Planification d'un chemin, permettant à l'individu d'évaluer son déplacement au sein de l'environnement jusqu'à la tâche sélectionnée, et donc de se projeter dans le temps et l'espace.
- c) Navigation et locomotion, qui vont gérer le déplacement local d'un individu tout au long du chemin planifié (Paris, 2007).

6.3 Résultats d'observation sur le comportement de navigation piétonnier

Les études qui ont été conduites sur le problème du comportement piétonnier sont nombreuses. Par exemple, dans le domaine de l'étude des flots, des statistiques sont effectuées en vue d'analyser le comportement piétonnier pour assurer à plus long terme une certaine qualité de navigation. Au cours de ces études, un certain nombre de caractéristiques de ce comportement ont pu être mises en évidence (Helbing, 2001) :

- Les piétons montrent une certaine aversion à prendre des détours ou à marcher dans une direction opposée à leur direction désirée (celle les menant vers leur but), même dans des environnements peuplés. Cependant, ils ont tendance à choisir la route la plus rapide qui n'est pas forcément la plus courte. En général, les notions de détour et de confort de navigation sont prises en compte en vue de minimiser l'effort à fournir.

- Chaque piéton possède sa vitesse individuelle correspondant à la vitesse la plus confortable, autrement dit celle qui permet de minimiser la dépense d'énergie. Du point de vue de la personne, cette vitesse est corrélée à plusieurs facteurs comme le sexe et l'âge par exemple. Le respect de cette vitesse dépend aussi de facteurs externes tels que la raison du déplacement (la personne est elle pressée ou non ?) ou encore de la densité de la foule.
- Les piétons tentent de conserver une certaine distance avec les autres piétons et les obstacles de l'environnement. Cette distance varie en fonction du contexte, elle se réduit si le piéton est pressé ou si la foule devient dense. Dans le cas de piétons stationnaires (attente d'un train, attente d'un bus...), la tendance est de se répartir uniformément dans l'espace. Cependant, autour des endroits attractifs (statue, monument...), la densité des piétons augmente. Les individus se connaissant peuvent former des groupes, ces groupes ont alors tendance à exhiber un comportement similaire à celui d'un piéton seul.
- Lorsque la densité des piétons devient grande, la tendance générale ressemble à l'évolution d'un fluide. Au milieu de foules statiques, on peut remarquer une tendance à créer des flots ; en environnement dense, on peut remarquer la formation de zones de navigation regroupant des piétons allant dans la même direction.
- Dans les situations de paniques, les individus ont tendance à développer des comportements 'aveugles' et essayent de se déplacer beaucoup plus vite que de normale. Les interactions entre les piétons deviennent alors physiques, allant jusqu'à la bousculade. Les personnes blessées ou tombées constituent alors des obstacles gênant la progression. Finalement, un comportement mimétique est en œuvre ; les piétons ont tendance à faire comme les autres, à aller où vont les autres, au détriment de l'exploitation d'opportunités de sorties différentes.

Ces résultats exposent les tendances générales associées à la navigation. D'autres études se sont plus particulièrement intéressées à la manière d'éviter une collision et à la direction adoptée. Selon Goffman (1971), en accord avec le premier point suscités les piétons sont réticents aux changements de direction, et lorsqu'ils y sont obligés ils privilégient les plus petits changements minimaux. Un piéton aura donc tendance à effectuer un évitement de collision en minimisant l'angle de déviation. Cependant, comme le fait remarquer Lee et Watson (1992), l'organisation globale des flux piétonniers est similaire à celle observée

pour les véhicules respectant le code de la route. Autrement dit, en Angleterre nous trouverons une tendance à l'évitement à gauche, alors qu'en Algérie, la tendance sera à l'évitement à droite. Dans le cas de situations relativement denses, l'application de cette règle permet d'obtenir un consensus global. Les flots s'organisent, ayant pour conséquence une circulation plus fluide. Des détails supplémentaires sur le comportement de navigation en environnements urbains (traversée de rue, attention visuelle...) peuvent être consultés dans la thèse de G. Thomas (1999).

7 Conclusion

De nombreux modèles de simulation des piétons ont été développés au cours des années dans plusieurs disciplines comprenant : l'infographie, la robotique et la dynamique d'évacuation. Ceux-ci peuvent être groupés dans deux méthodes principales : macroscopique et microscopique. Les modèles macroscopiques étudient la foule comme un tout et ne considère pas l'interaction entre les individus, et ils sont caractérisés par un coût faible de calcul. Ces modèles exhibent un comportement réaliste dans le cas d'une densité de population importante, mais ils ne prennent pas en compte ni la perception visuelle, ni les règles sociales. Tandis que Les simulations microscopiques considèrent le mouvement des piétons au niveau individuel. Elles traitent des piétons comme individus et modèlent le comportement de l'individu avec l'espérance que les comportements dynamiques de foule émergeront des interactions entre les individus et l'environnement (Pelechano *et al.*, 2008). Dans ces dernières années, beaucoup des modèles de simulation microscopiques de foule sont proposés qui permettent à peupler des environnements virtuels, étudient les interactions entre les individus (Pan, 2006; Musse, 2000), l'émergence des comportements collectives, les évitements de collision et les règles psychologiques et sociologiques qui influencent les comportements des humains. Dans le chapitre suivant on va citer quelques travaux de simulation des foules virtuelles qui ont été discutés dans la littérature. Nous nous intéressons par la suite aux modèles de simulation microscopiques des piétons.

Chapitre 3

Foule d'humains virtuels

1	Introduction.....	50
2	La simulation de foule	50
3	Les modèles de foule	51
4	Situation de la foule	58
5	Classification des modèles de foule.....	59
6	Conclusion	61

1 Introduction

La foule et les simulations de groupe deviennent de plus en plus importantes dans plusieurs domaines tel que l'industrie de divertissements et la simulation de secours. Elles peuvent être employées pour simuler la présence de vrais humains. Une telle technologie peut être employée dans des situations très dangereuses pour que des personnes réelles en soient les vrais acteurs.

L'élément essentiel dans les simulations de foules de piétons est le modèle de comportement de la foule. Depuis de nombreuses années, les chercheurs ont développé de nombreux modèles de foules (Qiu, 2010; Shao et Terzopoulos, 2005; Musse et al., 1999; Brogan et al., 1998; Bouvier et al., 1997; Mataric, 1994; Terzopoulos et al., 1994). La plupart de ces modèles sont inspirée par les travaux de Craig Reynolds sur la simulation de groupes (Reynolds, 1999; Reynolds, 1987).

Ce chapitre présente un état de l'art des foules virtuelles. Cette partie de travail sera consacrée à étudier de près les détails des modèles de foule que nous venons de citer et qui ont été discutés dans la littérature. Cette étude est réalisée dans un objectif de bien sélectionner le modèle adéquat pour la modélisation de structure de groupe. Le modèle ainsi choisi, à l'issue de cette partie, sera traité ultérieurement dans un chapitre à part.

2 La simulation de foule

La simulation de foule permet d'étudier le mouvement d'un grand nombre d'entités dans un environnement virtuel. Cet axe de recherche a suscité de vastes domaines tout au long de ces dernières années (figure 3.1). L'idée globale derrière la simulation de foule est de permettre à des entités virtuelles de se comporter d'une manière normale, agissant les unes sur les autres, et ce en exploitant surtout des règles de comportement social. En effet, les applications de la simulation de foule sont nombreuses, elles peuvent être résumés dans la figure 3.2.

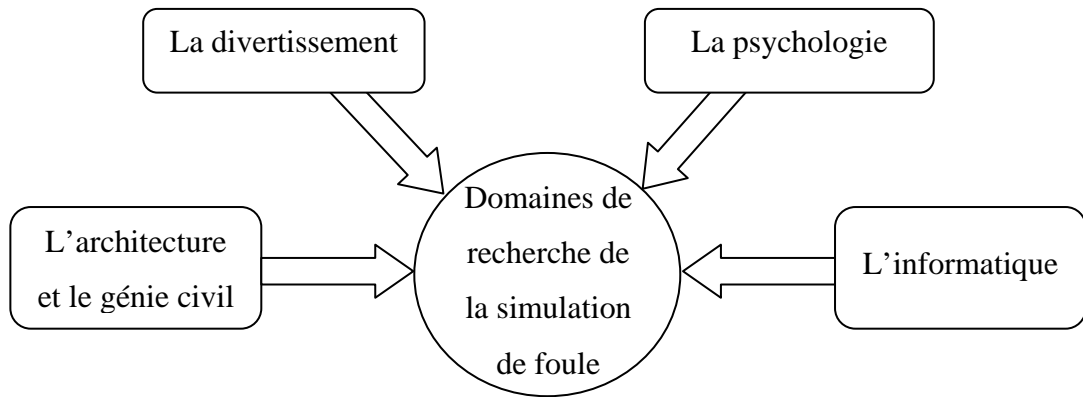


Figure 3.1 : Domaines de recherche de la simulation de foule (Sharbini, 2010).

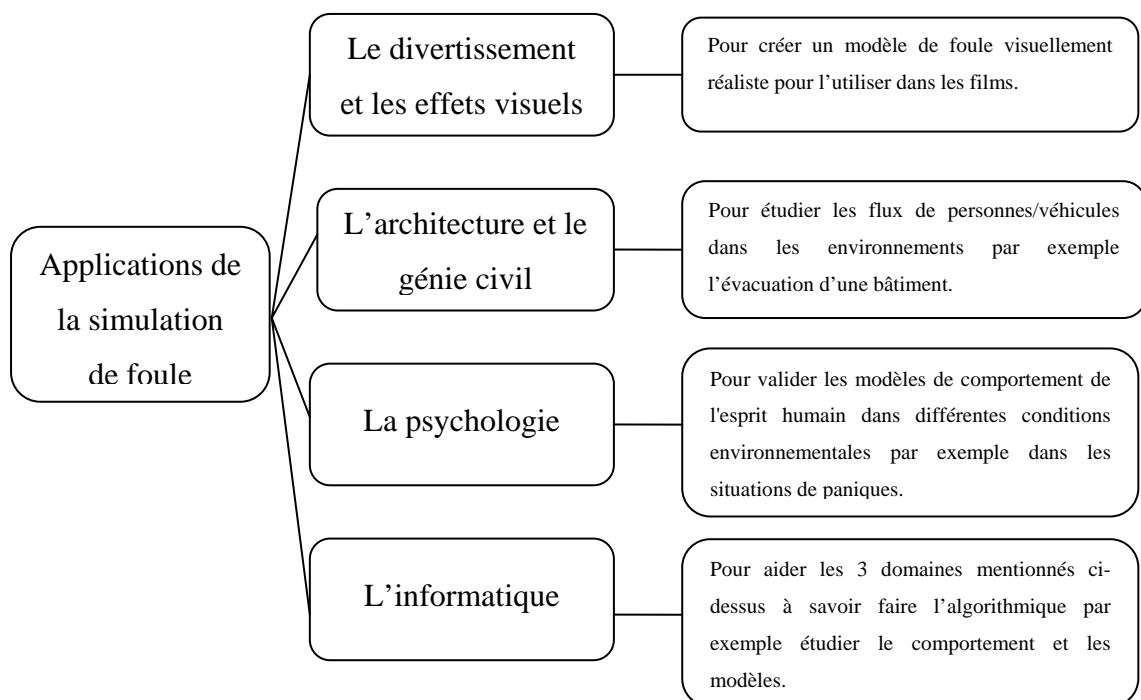


Figure 3.2 : Applications de la simulation de foule (Sharbini, 2010).

3 Les modèles de foule

Le concept de rassemblement a été présenté la première fois par Reynolds dès 1987. Il s'est attaché à construire un modèle comportemental permettant d'animer un ensemble d'individus à l'aide de la description du comportement individuel de chaque animal appartenant au groupe (Reynolds, 1987). Le terme 'boids' représente le nom générique de ces entités. Ce modèle est constitué de trois comportements de base décrivant le déplacement d'un 'boid' en fonction des positions et vitesses des individus à proximité de lui (figure 3.3). *La cohésion* permet de garder une formation. *La séparation* permet d'éviter

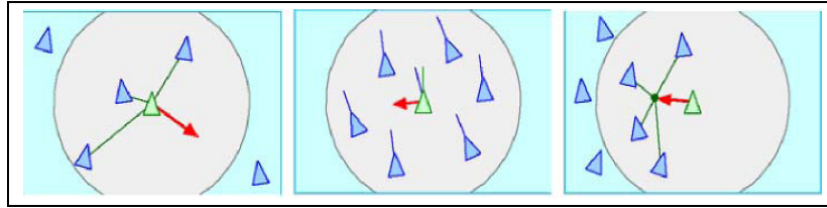


Figure 3.3 : Comportements primaires des boids : séparation, alignement, cohésion
(Reynolds, 1987).

les agrégats, et *l'alignement* est utilisé pour obtenir un déplacement uniforme des individus. En sommant les vecteurs résultants de ces opérations Reynolds obtient le vecteur de déplacement désiré.

Cette technique paraît relativement basique mais permet, par émergence, d'obtenir des comportements complexes. Cette méthode sera, par la suite, utilisée avec succès dans l'industrie cinématographique pour animer des bancs de poisson, ou des hordes de chauves souris. Les applications de ce modèle restent limitées à des animations de groupes d'individus.

Terzopoulos a initié le modèle général utilisé en simulation comportementale. Un environnement virtuel est simulé pour créer des comportements de recherche de nourriture, de prédation et d'accouplement. Ce système est composé de trois sous systèmes responsables de la perception, de la sélection du comportement, et du contrôle moteur des entités (Terzopoulos et al., 1994).

Des senseurs virtuels fournissent des informations sur la dynamique de l'environnement. Le système comportemental établit un lien entre la perception et le système moteur en déterminant les paramètres de contrôle des actions en fonction des perceptions couplé avec un générateur d'intention.

Le système moteur comprend un modèle dynamique de l'entité accompagné d'un ensemble de contrôleurs dédiés à la production d'un mouvement spécifique. Il décompose un ordre de haut niveau (tourner à gauche par exemple) en activations des contrôles moteurs nécessaires pour réaliser cette action (muscles).

Le résultat présente les évolutions de poissons dans des fonds sous-marin établis à partir de contractions musculaires, conséquence de la perception de l'environnement (figure 3.4).

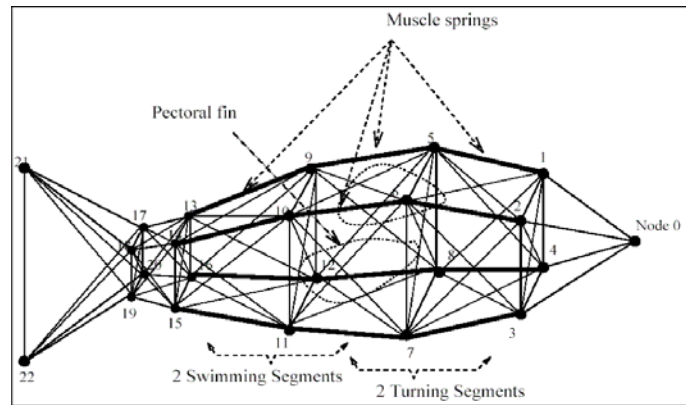


Figure 3.4 : Modèle dynamique masse/ressort d'un poisson de Terzopoulos (1994).

Mataric a décrit des comportements émergents de 20 robots mobiles, ce qui démontre le comportement d'errance de groupe, de poursuite, d'agrégation, de dispersion ainsi que d'assemblage. Quelques comportements complexes tels que l'assemblage ont été produits en combinant des comportements simples comme l'agrégation et le suivi par exemple. Cependant, des comportements hétérogènes sont étudiés pour fournir une hiérarchie de groupe où les robots peuvent agir différemment (Mataric, 1994).

Bouvier a employé des systèmes de particules adaptés pour étudier des mouvements de foule où les êtres humains sont modélisés comme un ensemble de particules dont les éléments agissent les uns sur les autres. Cependant, le mouvement des personnes est basé sur les forces Newtoniennes, de même pour les buts et les décisions humaines. Ils ont présenté le concept de la 'charge de décision' et des 'champs de décision' modélisés en utilisant les notions de charges électriques dans ce sens qu'une particule avec une charge électrique sera influencée par un champ électrique comme une personne avec une charge de décision (Bouvier et al., 1997).

Brogan et Hodgins ont employé la dynamique pour modéliser le mouvement des groupes en utilisant les concepts de la physique. Ils reproduisirent des mouvements de robots, de cavaliers à jambes de bicyclette et des systèmes de masse-point basés sur la dynamique, un algorithme pour déterminer la position désirée pour chaque individu donné, les positions et les vitesses des créatures ainsi que les obstacles évidents. En effet, un processus de perception a été associé aux acteurs dans le but de déterminer les obstacles évidents pour chaque individu dans le groupe. Ce processus précède l'entrée en action de l'algorithme de déplacement (Brogan et al., 1998; Brogan et Hodgins, 1997).

En 1999, Reynolds étend son premier travail, il a décrit un modèle distribué de comportement pour simuler des bandes d'oiseaux constitués par des acteurs dotés de

qualifications de perception. En fait, ces oiseaux maintiennent la position et l'orientation appropriées de la bande en équilibrant leur faculté d'éviter des collisions avec leurs voisins, pour assortir leur vitesse avec celle de leurs voisins ainsi que leur mouvement vers le centre de la bande. Le travail de Reynolds met en évidence une animation de groupe très réaliste, créée en appliquant des règles locales simples dans une structure de bande (Reynolds, 1999).

Le groupe de Thalmann (2001) a développé un système de foule appelé ViCrowd. ViCrowd a présenté un modèle pour produire automatiquement des foules humaines basées sur des groupes, à la place d'individus (figure 3.5). Les groupes sont des structures plus intelligentes, alors que les individus suivent les spécifications de groupes. ViCrowd est basé sur des règles locales appliquées aux groupes, où les groupes ne représentent pas une structure rigide. En outre, une définition des règles comportementales en utilisant des événements et des réactions conditionnelles est incluse pour fournir des foules plus autonomes.

La simulation des foules humaines dans le but de peupler des mondes virtuels fournit un sens plus réaliste de la présence virtuelle de groupe. Il existe plusieurs approches pour modéliser des foules autonomes (Reynolds, 1999; Bouvier et al., 1997; Brogan et Hodgins, 1997). Dans quelques environnements virtuels, il est souvent utile de simuler des populations d'une manière autonome, ainsi les agents ont un type de connaissance et peuvent se déplacer et agir l'un sur l'autre dans cet environnement. Cependant, selon l'application, différentes manières d'interaction peuvent être exigées afin de fournir une communication en temps réel entre les participants et les agents virtuels. Le groupe de Thalmann a défini trois niveaux d'autonomie: (Foule autonome, foule guidée et foule programmée) (Musse et al., 1999).

Ces trois niveaux d'autonomie sont représentés en utilisant deux types d'interface: interface pré-établie ou guidée. L'interface pré-établie emploie un langage de scripts où l'action, le mouvement et les règles comportementales sont définis afin d'indiquer les comportements de foule. Tandis que l'action et le mouvement décrivent des comportements explicites de foule, appelés foule programmée, les règles comportementales sont employées pour définir la foule autonome. Toutes ces informations peuvent également être envoyées par un processus externe afin de guider des foules explicitement, pendant la simulation. Ils ont appelé ce type de foule 'foule guidée'.

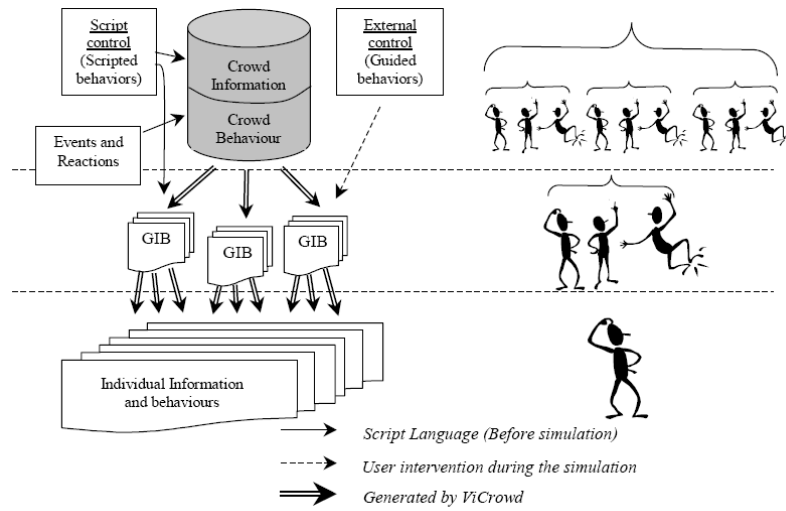


Fig. 4-1: Hierarchical structure of the model.

Figure 3.5 : La structure hiérarchique du modèle ViCrowd (Musse et al., 2004).

SIMULEX développé par Thompson et Marchant (2003), décrit un logiciel bidimensionnel modélisant l'évacuation d'une grande population dans un bâtiment. Le but de SIMULEX était de modéliser le mouvement d'évasion de chaque occupant individuel dans un bâtiment, où la vitesse de marche de chaque personne est évaluée indépendamment de la densité moyenne du groupe dans un secteur défini d'un bâtiment.

Wei Shao et Terzopoulos ont adressé le problème difficile non résolu d'émulation de la complexité de vrais piétons dans des environnements urbains. Leur approche artificielle de la vie intègre les composants moteurs, perceptuels, comportementaux, et cognitifs dans un modèle de piétons comme individus. Leur modèle complet comporte des innovations dans ces composants, notamment dans leur combinaison, donnant des résultats de fidélité et de complexité sans précédent pour la simulation multi-humaine entièrement autonome dans un grand environnement urbain. Ces innovations techniques représentent l'environnement en utilisant des structures de données hiérarchiques, qui soutiennent efficacement les questions perceptuelles des piétons autonomes qui conduisent leurs réponses comportementales et soutiennent leur capacité de projeter leurs actions sur les échelles locales et globales (Shao et Terzopoulos, 2005).

Qiu et Hu (2010) ont proposé un cadre uniforme pour la modélisation des différents structures de groupes d'une foule des piétons. Dans leurs travaux ils ont défini la foule comme un ensemble de groupes, ou chaque groupe est composé d'un ou de nombreuses individus. Deux aspects sont considéré: la structure intra-groupe et les relations inter-groupe. Sur la base de ce cadre, les auteurs ont développé une simulation de foule à base des règles, et ils ont présenté des simulations de comportement de la foule utilisant les

deux aspects précédents de la structure de groupe. Les résultats de cette simulation montrent que la taille du groupe (qui est défini par le nombre d'individus dans ce groupe), et la structure des différents groupes peuvent avoir un impact important sur le comportement de la foule.

Sharbini (2010) a présenté dans sa thèse une comparaison entre les avantages et les inconvénients des travaux de simulation et modélisation de foules, depuis les premiers modèles jusqu'aux les plus récents. Cette analyse est indiquée dans le tableau 3.1.

Auteurs	Modèles	Avantages	inconvénients
Reynold's	Système de flochage/ modèle à base de règles (1987)	<ul style="list-style-type: none"> - Les agents peuvent chercher les buts, déplacer en groupe et ils peuvent éviter la collision. - Chaque 'boid' agit d'une manière indépendante, il perçoit l'environnement local et donc il maintient la position et l'orientation appropriée. - Un mouvement humain plus réaliste pour les foules à faible et haute densité. - Adopter habituellement une approche prudente en évitant la collision. 	<ul style="list-style-type: none"> - Il a seulement des informations locales et il ne connaît pas l'environnement global. Ainsi l'agent perçoit ses voisinages (compagnons de troupeau ou obstacles). - Il ne peut pas gérer les contacts entre les individus, donc il ne simule pas le comportement « pushing ». - Appliquer les règles d'attentes pour réaliser un comportement de foule ordonné sans nécessité de calculer la détection de collision.
Tu & Terzopoulos	Système comportemental (1994)	<ul style="list-style-type: none"> - Représentation efficace des comportements réalistes et complexes d'un grand nombre d'agents. - Utilisation des caractères réutilisables ce qui est particulièrement avantageux à l'industrie cinématographique et les jeux d'ordinateur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Il autorise seulement quelques agents, et il n'est pas basé sur la physique.
Saiwaki et. al.	Modèle de chaos (1997)	<ul style="list-style-type: none"> - Il peut observer des différents comportements malgré le nombre réduit de paramètres. - Les foules sont définies comme des agents indépendants mobiles, qui ont un modèle général de mouvement. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le nombre réduit de paramètres dus à la sensibilité de système aux conditions initiales et à la non régularité.
Reynolds	Système à base d'agents (1999)	<ul style="list-style-type: none"> - La capacité de capturer la variabilité des différentes caractéristiques et l'hétérogénéité de mouvement. 	<ul style="list-style-type: none"> - L'agent compare son état avec tous les états résultantes d'une complexité de temps en $O(n^2)$, dans laquelle les systèmes à base d'agents sont les sous ensembles des systèmes multi agents. Ces sous-ensembles sont collectés de plusieurs agents, ils sont capables d'atteindre un but collectif.

Helbing et. al.	Modèle de force sociale (2000)	- Des forces répulsives et tangentielles pour simuler les interactions entre les obstacles et les personnes, les comportements « pushing » sont réalistes et les débits sont variables.	- Les agents semblent secouer ou vibrez anormalement dans les foules à haute densité.
Musse & Thalmann	Système hybride (le floccage à base d'agents et les systèmes comportementaux) (2001)	- Les intentions, les croyances et les connaissances sont prises en considération pendant la simulation, ce qui est très important dans la détermination de comportement de la foule.	- Exige la modélisation de la structure hiérarchique et de l'information de foule, concernant également la répartition des groupes. - Différents niveaux de réalisme, pour fournir des comportements simples de la foule. - Exige une structure pour assurer les interactions avec les groupes d'agents pendant la simulation en temps réel.
Hughes	Modèle de dynamique des fluides/ Automates cellulaires (2003-2004)	- Pour gérer les obstacles et le piéton agira en combinaison des groupes de personnes. - L'automate cellulaire est rapide et simple à mettre en œuvre.	- Les automates cellulaires n'autorisent pas les contacts entre les agents.
Shao & Terzopoulos	Modèle cognitif (mélange avec le modèle à base des règles) (2005)	- Combiner avec les modèles à base des règles pour réaliser des comportements plus réalistes pendant la simulation des piétons. - Différentes règles comportementales peuvent être appliquées à la foule, au groupe ou aux individus pour produire un comportement de foule crédible.	- Limité à un ensemble de règles définies. - Non applicable à différentes situations.
Pette & Thalman, Pelechino & Badler, Lerner et. al.	Cellule et portails graphiques (2005-2006)	- Des informations peuvent être intégrées dans la représentation de haut niveau de l'environnement virtuel, pour réaliser la simulation de la foule en temps réel.	- Inefficace lorsque la résolution est faible. - Pour qu'il être pratique, le nombre de cellules nécessaires augmente si la dimension de l'espace de configuration est plus élevée, ou la complexité de la scène est très grande.

Tableau 3.1 : Comparaison entre les avantages et les inconvénients des travaux de simulation de foule (Sharbini, 2010).

4 Situation de la foule

La figure 3.6 montre que la simulation de foule est séparée en deux groupes principaux. Les détails de ces deux situations peuvent être résumés dans le tableau 3.2 (Sharbini, 2010).

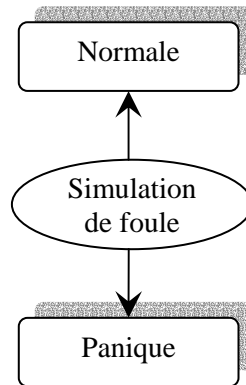


Figure 3.6 : Situation de la foule (Sharbini, 2010).

Situation normale	Situation de panique
Ressemble à un modèle de simulation à base de flux.	Peut être visée à des situations stressantes.
Lenteur de déplacement dans des directions différentes de flux principal dans les rues.	Peut commencer comme une situation normale et peut sortir de la commande plus tard.
Les agents sentent une aversion forte à prendre des détours ou à se déplacer vis-à-vis de la direction de marche désirée, même si la manière directe est serrée.	Un désastre important de la foule se produit en raison de sa taille croissante.
L'itinéraire le plus rapide et le moins encombré est la décision la plus aimée.	Généralement provoquées par des humains même temps avec les catastrophes naturelles comme les feux et les tremblements de terre.
La plupart des personnes tiennent compte des détours aussi bien que du confort de la marche, réduisant au minimum de ce fait l'effort permettant d'atteindre leur destination.	La panique signifie une hystérie collective qui résulte un grand nombre de victimes, particulièrement si elle se produit dans une foule dense de personnes.
La zone confortable est une partie principale par laquelle les agents évitent la collision avec les autres, ils ne peuvent pas obtenir le moindre contact physique avec des inconnus.	Ne peut pas être comparée à une simulation d'écoulement de fluide, parce qu'il n'y a aucune répartition équitable et forcément les étapes suivantes étant prévues.
La possibilité de garder une certaine distance vis à vis d'autres agents et obstacles, mais cette distance sera plus petite lorsqu'un agent est pressé, et elle diminue avec l'accroissement de la densité de la foule.	Les gens tendent à montrer un mélange de comportement de troupeau et de comportement individuel.
Le comportement général de la foule et le comportement individuel sont visualisables.	Les concepts de groupes sont perdus, ainsi, chaque individu peut agir différemment du reste du groupe.

Tableau 3.2 : Les différences entre la situation normale et la situation de panique.

5 Classification des modèles de foule

Nous proposons dans cette section deux classifications pour les travaux effectués autour de l'animation de foule. La première est liée aux méthodes employées pour représenter les mouvements des foules et des comportements (tableau 3.3). La seconde propose une classification des foules selon leurs applications.

La classification suivante décrit les méthodes, qui peuvent être employées pour représenter les foules :

- Méthodes de foules basées images: définissent les méthodes de transformation de l'image et de vision à saisisent l'information de vraies foules.
- Modèles de foule basés physique: utilisés pour décrire le mouvement de foule sur la base de fondements de la physique.
- Modèles procéduraux: basés sur la description d'équations paramétriques.
- Modèles comportementaux: fournissent un outil pour simuler des foules sur des fondements basés comportement.

Modèle de foule	A base d'image	A base physique	Procédural	Comportemental	
Méthodes	Vision par ordinateur	système de particules, mécanique des fluides	Fractales, subdivision spatiale	Flocking, Règles comportementales	
Auteurs principaux	Velastin team, Park	Bouvier et al, Brogan et al, Stam, Antz	SIMULEX Logiciel commercial	Reynolds, Mataric, Tu and Terzopoulos	Modèle ViCrowd
Structure	Non hiérarchique	Non hiérarchique	Peut présenter la hiérarchie	Peut présenter la hiérarchie	Niveaux : foule, groupes agents,
Participants	Plusieurs	Plusieurs	Plusieurs	Quelques	Beaucoup
Intelligence d'individu	Aucune	Aucune	Aucune	Haut	Peu
Intelligence de groupe	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Haut
Collision	Aucune	Détecent et répondent	Evitement ou non	Evitement	Evitement
Contrôle	Aucune	Force des champs, Tendance Globale	Peu	Tendance locale ou Règles	Différents degrés, Comportement programmé, Règles et contrôle guidée
Interaction	Aucune	Peut représenter	Peut représenter	Peut représenter	Quelques paradigmes, d'interactions pour guider la foule

Tableau 3.3 : Tableau présente les différentes modèles de foule (Liu et Chen, 2008).

Le tableau 3.3 est modifié à partir de la version originale de Rick Parent (2002). Il présente une classification de plusieurs méthodes de modélisation de groupes ou de foules. Différents paramètres caractérisent chaque méthode : à titre d'exemple, les modèles basés sur la physique peuvent représenter plus d'individus que les modèles comportementaux. ViCrowd contrôle des groupes en tant que structures plus complexes que des individus, nous pouvons considérer que l'adaptabilité ne représente pas un problème puisque seuls les chefs peuvent véhiculer un certain degré d'intelligence. Cependant, il peut exister quelques lacunes entre l'intelligence modélisée par ViCrowd et les autres méthodes comportementales parce que quelques simplifications ont été faites.

Les méthodes présentées dans le tableau 3.3 peuvent être choisies en fonction de la nature des foules requises dans les applications. En effet, il y a différents types de contraintes selon le but de l'application. Par exemple, si l'application consiste à modéliser un mouvement de foule pendant une évacuation, aussi bien la commande interactive que la simulation de comportement ne peut être importante. Nous avons classifié ces applications selon quatre types et ce sur la base des différents buts :

- *les applications de divertissement* incluent des productions et des jeux de film. Dans ce cas, des groupes aussi bien que des individus doivent être facilement commandés et dirigés. Quelques exemples sont les films récents "AntZ" (1999) et "Bugs Life" (1999). Les défis incluent la simulation de plusieurs personnes aussi bien que la génération automatique des individualités. En outre, la commande facile des groupes représente une condition de ce genre d'application.
- *la simulation de mouvement de foule* vise à évaluer le mouvement de plusieurs personnes dans un environnement contraint. Elle implique normalement une visualisation simple (incorporation de foule) et un compromis fort avec les résultats numériques afin d'évaluer l'environnement. Quelques logiciels commerciaux, par exemple, SIMULEX (Thompson et Marchant, 1995) et LEGION (Still, 2000) sont des exemples de ce genre d'application de foule. Les défis principaux dans ce cas incluent une méthode réaliste d'action pour l'évitement de collisions, un raccordement fort avec l'environnement et a compromis avec les résultats numériques et statistiques.
- *afin de peupler les environnements virtuels de collaboration* par exemple dans un système de CVE (collaborative virtual environment), la foule a besoin d'une

simulation en temps réel, aussi bien que beaucoup d'aspects de l'interactivité pour guider et diriger les foules pendant la simulation. La programmation du comportement de foule représente un défi important dans les environnements virtuels de collaboration, où les participants peuvent créer et agir l'un sur l'autre avec des foules. Quelques expériences ont été faites dans le contexte du projet de COVEN (Tromp et Snowdon, 1997).

- le dernier type d'application de foule est la modélisation comportementale des foules. Dans ce cas, le but est de fournir les comportements autonomes ou semi autonomes qui peuvent être appliqués pour une self-animation des agents formant la foule. Afin de traiter les contraintes dues au grand nombre d'acteurs (centaines ou milliers), ce genre d'application présente les défis suivants : description des aspects sociologiques et sociaux qui surgissent dans les foules, en traitant les comportements et le raccordement dirigés et émergents avec environnement virtuel. En outre, des optimisations et des simplifications sont exigées afin de modéliser et simuler l'intelligence de foule et les capacités de décision. (Musse, 2000).

6 Conclusion

La simulation et la modélisation de comportement de foules présentent une thématique de recherche assez active depuis plusieurs années. En effet, elle est liée à de nombreuses disciplines, telles que la sécurité, l'architecture, le transport, les sciences sociales et les jeux d'ordinateurs...

Dans ce chapitre, la simulation de foule a été étudiée à l'aide de différents modèles, en présentant des détails de quelques modèles existants suivant un ordre chronologique depuis le premier modèle proposé par (Reynolds, 1987) jusqu'à le récent modèle développé par (Qiu et Hu, 2010). Cette partie, de modélisation et d'analyse bibliographique, a permis d'établir une conclusion importante à propos de la modélisation de la structure des différents groupes. En effet, parmi les travaux cités plus haut, aucun modèle n'a considéré la structure des différents groupes, qui peut avoir un impact important sur le comportement de la foule, excepté les travaux de Qiu et Hu (2010).

Chapitre 4

Modélisation des structures de groupe

1	Introduction.....	63
2	Le groupement et les groupes sociaux.....	63
3	Cadre de la modélisation des structures de groupe	64
4	Notre système de simulation d'une foule de piétons	68
5	Modélisation des structures de groupe	74
6	Etude des cas : Les formes de groupes sociaux	82
7	Conclusion	84

1 Introduction

Le groupement des piétons est un phénomène habituel dans la foule des piétons, il joue un rôle important dans le comportement de la foule. En effet, pour explorer l'effet de groupement sur les comportements de la foule, il est nécessaire d'étudier différents aspects des groupes sociaux, tels que les relations entre les membres de groupe, le contexte dont les groupes fonctionnent, la capacité physique et psychologique, la taille et la densité de groupe (Santos et Aguirre, 2004). Jusqu'à présent cet effet n'a pas été largement étudié dans la littérature, ce problème est dû au fait que la modélisation de comportement est une tâche difficile en raison des nombreux facteurs qui doivent être considérés.

Le présent chapitre propose un cadre uniforme pour la modélisation des différentes structures de groupe d'une foule des piétons. Le cadre proposé inclut des multiples couches : i) une couche de moteur de simulation qui fournit des moteurs de simulation efficaces pour simuler le modèle de la foule ; ii) une couche de modélisation de l'agent à base de comportement qui inclut le module de visualisation et d'animation, le modèle de l'environnement, et le modèle de l'agent ; iii) une couche de modélisation de groupe qui fournit un moyen bien défini pour modéliser les relations inter et/ou intra groupe entre les agents de la foule des piétons.

Nous présentons dans ce chapitre les détails de ces couches et les relations entre eux, ainsi la conception détaillée de notre système de simulation d'une foule de piétons.

2 Le groupement et les groupes sociaux

Le groupement est un phénomène commun dans notre vie quotidienne surtout dans les foules. En effet, la foule de piétons contient des groupes plus que des individus isolés. Par exemple : des membres de la famille marchent ensemble dans un centre commercial, un chef guide un groupe de visiteurs à différentes expositions populaires...etc.

Le groupe social n'est pas une simple collection ou un agrégat des individus, il a également des caractéristiques partagées par ses membres tel que : la distance spatiale entre les membres (la distance euclidienne), le but et les intérêts semblables (visiter la même exposition), l'origine sociale (la socialité, l'émotion). Il existe plusieurs définitions de groupe social dans différents domaines, par exemple : dans les sciences sociales un groupe est généralement défini comme deux ou plusieurs êtres humains qui interagissent les uns avec les autres, et partagent une identité commune (Qiu, 2010). En informatique, le groupe

social est défini par un grand nombre d'individus dans le même environnement physique, qui partagent le même but (par exemple des gens vont à un match de football) (Musse et Thalmann, 1997).

3 Cadre de la modélisation des structures de groupe

Le génie logiciel est un ensemble des méthodes de techniques et d'outils pour la production de logiciel de qualité avec maîtrise des coûts et délais. Dans ce domaine les phases de création d'un logiciel informatique sont : l'analyse du besoin, l'élaboration des spécifications, la conceptualisation, le développement, la phase de test et finalement la maintenance. La conception est une phase très importante dans le cycle de vie d'un logiciel, elle décrit de manière non ambiguë, en utilisant un langage de modélisation, le fonctionnement futur du système pour faciliter la réalisation. Dans la phase de conception, la décomposition de système en petits sous-systèmes est un principe important de génie logiciel (Bruegge et Dutoit, 2004). Ce principe est utile pour la conception des systèmes complexes tels que les systèmes de foule, car il peut faciliter la maintenance si certains sous-systèmes sont modifiés.

La conception de notre système de simulation de foule de piétons est décomposé en trois sous-systèmes : le moteur de simulation, le modèle de la foule, et la visualisation. Le modèle de la foule est décomposé en d'autres modèles : le modèle de l'agent, le modèle de groupe et le modèle de l'environnement.

L'objectif de la conception est de réaliser la décomposition avec un couplage fort dans chaque sous-système et un couplage faible entre les sous-systèmes. Le couplage fort signifie que les unités constituées dans un sous-système sont liées les unes aux autres, et elles effectuent des tâches similaires. Le couplage faible signifie que les changements effectués à un sous-système n'auront pas un grand impact sur les autres sous-systèmes (Bruegge et Dutoit, 2004). Les techniques de mise en couches sont employées souvent pour réaliser le couplage faible. Une couche représente un niveau d'abstraction qui fournit seulement des services aux sous-systèmes d'une couche supérieure. Il y a beaucoup d'avantages des couches : faciliter l'identification de relations, faciliter la maintenance et la mise à jour de système.

On Applique les techniques de mise en couches, notre cadre de modélisation se compose de trois couches où l'architecture de chaque couche est concentrée sur une certaine fonctionnalité spécifique, comme montre la figure 4.1.

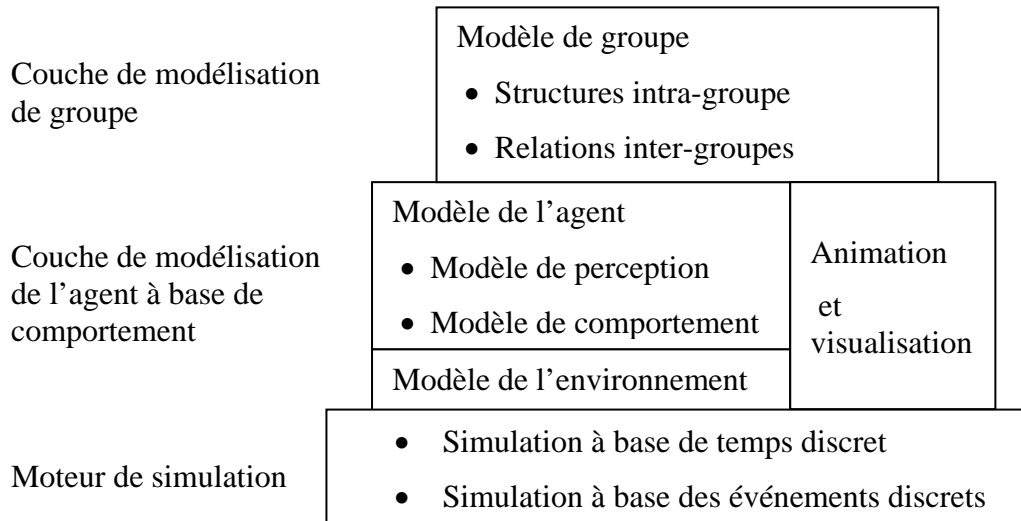


Figure 4.1: Notre cadre de modélisation de groupe avec l'architecture de trois couches.

Les couches de bas vers le haut sont : moteur de simulation, couche de modélisation de l'agent à base de comportement, couche de modélisation de groupe.

3.1 Couche de moteur de simulation

Le moteur de simulation conduit la simulation des comportements de la foule. Le protocole de base de la simulation suit une approche à base de temps discret. La simulation à base de temps discret est composée d'une liste des pas (itération) de temps continus, dans lesquels chaque piéton prend une décision de mouvement. La prise de décision est une composante importante dans le modèle de la foule de piétons. Dans chaque pas de temps, le moteur de simulation calcule les états physiques de chaque piéton en fonction de sa prise de décision tel que : la direction de déplacement, la vitesse,...etc. Ces états sont généralement introduits dans le sous-système de visualisation et d'animation afin d'afficher ou d'animer l'agent.

Le moteur de simulation peut aussi contenir un autre protocole de simulation, qui suit l'approche à base d'événements discrets, où la décision de mouvement des piétons est déclenchée uniquement par des événements, tels que le changement des états de l'environnement.

3.2 Couche de modélisation de l'agent à base de comportement

La couche de modélisation de l'agent à base de comportement contient le module de visualisation et d'animation, le modèle de l'environnement, et le modèle de l'agent.

- Le module de visualisation et d'animation permet de visualiser et d'animer les résultats de la simulation, c'est à dire les états physiques de l'agent. Dans notre

système, les résultats de simulation sont affichés sous forme d'une série d'images en deux dimensions.

- Le modèle de l'environnement décrit l'environnement virtuel de simulation dont lequel les piétons interagissent entre eux. L'interaction entre les piétons et l'environnement de simulation est réalisée par un processus de «perception-décision-mouvement». Dans ce processus, chaque piéton perçoit les informations de l'environnement par son modèle de perception, par la suite il prend une décision de mouvement basée sur le but désiré. Une fois la décision est réalisée, la direction de déplacement et la vitesse sont calculés et donc ce piéton effectue le mouvement. Ce processus change généralement l'état de l'environnement de simulation tel que les positions des piétons.
- Le modèle de l'agent est équipé par un modèle de perception et un modèle de comportement. Le modèle de perception spécifie la zone visible par le piéton pendant la simulation. Le modèle de comportement décrit le comportement exécuté par le piéton à chaque pas de temps. Il existe deux mécanisme pour exécuter les comportements : i) le mécanisme d'inhibition ii) le mécanisme de coopération. Pour le mécanisme d'inhibition un seul comportement est sélectionné pour contrôler le mouvement de l'agent. Pour le mécanisme de coopération, les comportements sont coopérés utilisant une approche de somme de vecteur, le mouvement de l'agent est commandé par le vecteur résultant (Qiu, 2010). Dans notre cadre de modélisation, nous avons utilisé le premier mécanisme où chaque piéton supporte trois comportements : *RandomMove*, *Avoid* et *MaintainGroup*. *RandomMove* permet au piéton de se déplacer aléatoirement autour de l'environnement de simulation. *Avoid* permet au piéton d'éviter les obstacles et aussi la collision avec d'autres agents. *MaintainGroup* permet au piéton de maintenir son groupe.

3.3 Couche de modélisation de groupe

Le modèle de groupe est un élément important dans la couche de modélisation de groupe, il peut être utilisé pour étudier systématiquement une variété de groupes sociaux et les différents aspects de ces groupes. Chaque groupe est étudié selon deux aspects : les structures intra-groupe et les relations inter-groupes. Les structures intra-groupe représentent les relations entre les membres, par exemple, la similarité et la familiarité dans

le même groupe. Les relations inter-groupes représentent les relations entre les groupes, par exemple le phénomène suivre dans une foule de piétons.

Il existe deux types des relations : les relations statiques et les relations dynamiques. Les relations statiques représentent des relations inchangeables pendant la simulation, elles sont habituellement trouvées dans les groupes sociaux stables, tel que les relations familiales. Par contre les relations dynamiques représentent des relations toujours changeables, on trouve généralement ces relations dans les groupes sociaux instables, tel que les groupes à base de tâche, où les relations sont temporairement formulées et distinguées après un certain temps (Qiu, 2010). Le modèle de groupe présenté dans notre travail étudie des relations statiques.

3.4 Relations entre les couches

Notre cadre de modélisation est décrit avec des couches faiblement connectées. Chaque couche utilise les services de la couche inférieure à travers un ensemble d'interfaces bien défini, comme montre la figure 4.2.

La couche de modélisation de groupe fournit les informations de groupe à la couche de modélisation de l'agent à base de comportement, en changeant l'entrée de comportement de maintien de groupe de telle sorte que les groupes peuvent être correctement maintenus.

La couche de modélisation de l'agent à base de comportement fournit les données de l'agent, comme la position actuelle, à la couche de moteur de simulation en changeant le canal d'entrée de moteur de simulation.

On note qu'il existe d'autres relations qui ne sont pas présentées dans la figure 4.2, par exemple les relations entre le moteur de simulation et le module de visualisation/animation, où le moteur de simulation fournit des données de simulation pour le module d'animation de visualisation qui affiche/anime les scénarios de simulation. Les relations entre le modèle de l'agent et l'environnement sont bidimensionnelles. Le modèle de l'agent obtient l'information de modèle de l'environnement pour prendre des décisions, qui changent alternativement l'état de l'environnement. Les relations entre le modèle de l'environnement et le module de visualisation/animation sont similaires aux relations entre le moteur de simulation et le module de visualisation/animation.

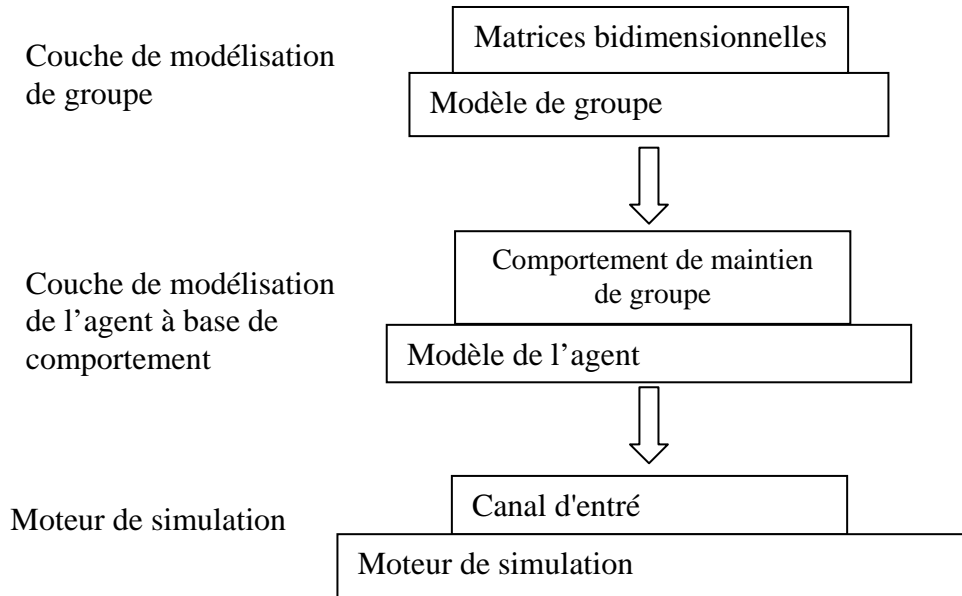


Figure 4.2 : Les relations entre les couches.

4 Notre système de simulation d'une foule de piétons

Pour faciliter la modélisation de groupe, on a proposé un système de simulation d'une foule des piétons sur le quel on a implémenté notre cadre de modélisation.

4.1 Spécification de système de simulation d'une foule de piétons

Notre système de simulation d'une foule des piétons est décrit comme un couple <Environnement, Foule>. 'Environnement' décrit l'environnement de simulation où les agents interagissent les uns avec les autres et 'Foule' décrit une foule des piétons spécifiques.

L'environnement de simulation inclut des primitives de simulation tels que les informations des obstacles tel que la forme, la taille et la position des obstacles. Les obstacles sont des entités fixes qui ne se déplacent pas pendant la simulation. Dans notre modèle les obstacles sont les murs, ils présentent les frontières de mouvement des piétons. On note que l'environnement de simulation comprend également des informations spatiales, telles que la taille et la forme des piétons.

Plus les primitives de simulation, l'environnement de simulation fournit également une plate-forme permet aux piétons de communiquer les uns avec les autres. Cette communication est réalisée par un ensemble de fonctionnalités fourni par l'environnement. Par exemple, l'environnement permet à un piéton d'obtenir la liste des piétons qui sont dans

sa zone de perception. Le tableau 4.1 présente les principales fonctionnalités utilisées par le piéton pour obtenir les informations de l'environnement de simulation.

Dans notre travail, les agents sont disposés dans un ensemble de groupes sociaux où chaque agent appartient à un et un seul groupe. Le nombre d'agents dans un groupe est noté (*Groupe Size*). On note que différents groupes peuvent avoir des tailles différentes, si un agent ne forme pas un groupe avec d'autres agents il est considéré comme un groupe constitué de lui-même. L'aspect important de notre travail est d'étudier les relations entre les agents dans le même groupe c'est-à-dire les structures intra-groupe, et les relations entre les différents groupes c'est-à-dire les relations inter-groupes. Par conséquent, notre foule de piétons est décrit comme $\langle \{\text{Groupes}\}, \text{relations inter-groupes} \rangle$, et le groupe est décrit comme $\langle \{\text{Agents}\}, \text{structures intragroupe} \rangle$. Ici, $\{\text{Agents}\}$ indique un ensemble de piétons appartiennent au même groupe (figure 4.3).

Chaque agent est constitué d'un ensemble d'attributs et de caractéristiques. Les attributs comme la vitesse de déplacement, la direction de déplacement...etc, ils caractérisent les états physiques de l'agent. Il existe deux caractéristiques importantes de l'agent piétonnier qui sont le modèle de comportement et le modèle de perception.

Fonction	Spécification
Find_in_perception	Trouver les piétons voisins dans la zone de perception
Find_pedestrian_to_follow	Trouver le piéton le plus similaire qui appartient à un groupe différent
Get_member_group	Trouver les membres d'un groupe spécifique
Get_group_leader	Trouver le chef d'un groupe spécifique
Eucliden_distance	Trouver la distance euclidienne entre deux points (deux positions)
Perpendicular_distance	Trouver la distance perpendiculaire entre un point et une ligne
Min_dist_to_agent	Trouver la distance entre un agent et l'agent voisin le plus proche
Min_dist_to_obstacle	Trouver la distance entre un agent et l'obstacle le plus proche
GetPosition	Trouver la position actuelle de l'agent
GetSpeed	Trouver la vitesse actuelle de l'agent

Tableau 4.1: les fonctions principales exécutées par le piéton.

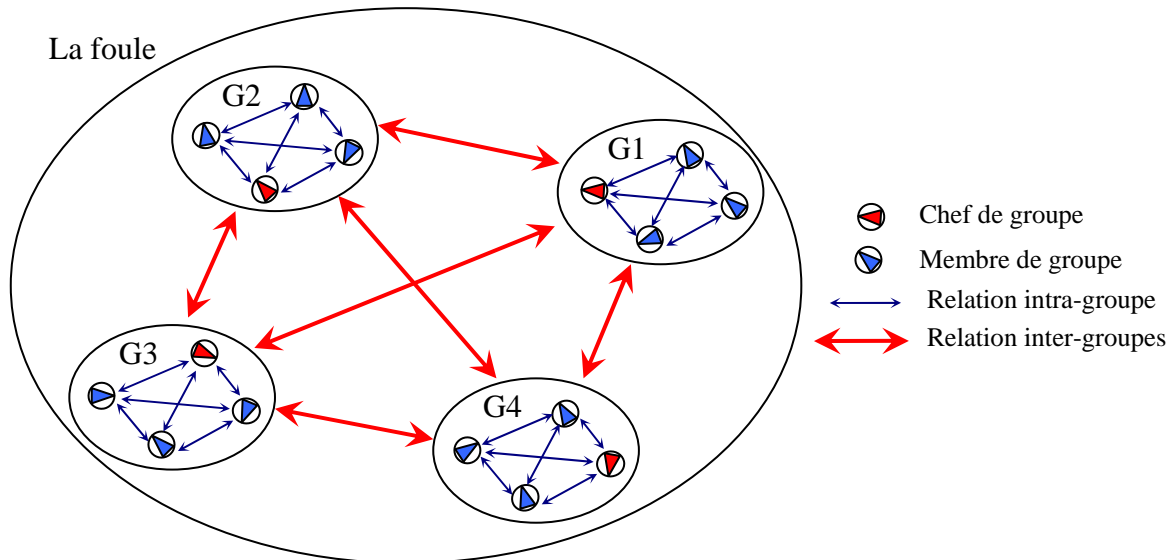


Figure 4.3 : Exemple d'une foule composée de quatre groupes avec quatre individus par groupe.

Chaque agent est décrit par $\langle ID, CurrentPosition, SpeedVector, Radius, PerceptionModel, BehaviorModel... \rangle$ où :

- ID est l'identificateur unique de l'agent.
- $CurrentPosition$ et $SpeedVector$ spécifient la position actuelle et le vecteur de vitesse de l'agent respectivement. Le vecteur de vitesse spécifie deux choses : la vitesse de déplacement et la direction de l'agent.
- Chaque agent est une forme circulaire dont le rayon est spécifié par $Radius$.
- $PerceptionModel$ spécifie la liste des piétons détectés dans la zone de perception.
- $BehaviorModel$ spécifie les comportements exécutés par l'agent.

L'agent possède d'autres attributs tels que $GroupID$, $Role$, GP , et GD qui sont utilisés dans la modélisation de groupe. Il est également décrit avec un modèle de perception et un modèle de comportement.

4.2 Modèle de perception de l'agent

Le modèle de perception de l'agent précise la région où l'agent peut percevoir. Dans notre modèle, les agents peuvent percevoir des obstacles et des piétons voisins, ils sont équipés avec le modèle de perception montré dans la figure 4.4. On croit que ce modèle peut atteindre une perception plus réaliste car il est basé sur le champ de vision humain (figure 4.5).

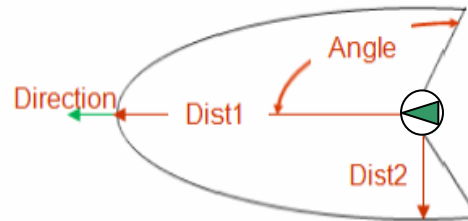


Figure 4.4: Modèle de perception de piéton (Qiu, 2010; Qiu et Hu, 2010).

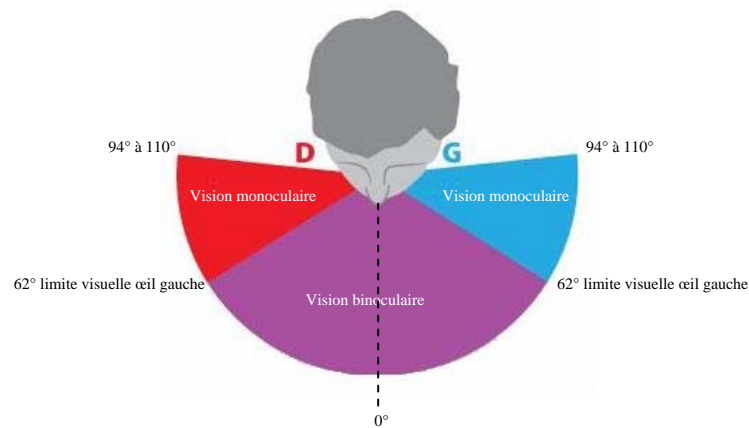


Figure 4.5 : Le champ visuel humain.

Dans la figure 4.4 la zone elliptique représente la zone visible, l'agent peut détecter seulement les obstacles et les agents dans cette zone. L'agent est montré dans la figure par la couleur verte, la direction actuelle de déplacement de l'agent est indiquée par 'Direction', *Dist1* et *Dist2* représentent la distance devant maximale et la distance latérale respectivement. *Angle* indique la moitié de l'angle de vue maximal détecté par le piéton, elle est d'environ 110° .

4.3 Modèle de comportement de l'agent

Chaque agent est décrit avec un modèle à base de comportement qui inclut trois comportements : le comportement de mouvement aléatoire, le comportement d'évitement, le comportement de maintien de groupe (*RandomMove*, *Avoid* et *MaintainGroup* respectivement). Ces trois comportements restent en concurrence et un seul comportement à la fois est sélectionné pour commander le mouvement de l'agent, le comportement avec la priorité la plus haute est choisi et l'action correspondante à ce dernier sera effectuée.

Dans chaque pas de simulation, la priorité de chacun des trois comportements est calculée. En générale le comportement *MaintainGroup* est le comportement le plus prioritaire

puisque nous nous intéressons aux groupes sociaux d'une foule de piétons. Mais on trouve que le comportement *Avoid* devient prioritaire à *MaintainGroup* dans deux cas :

- i) la distance entre le piéton et un autre détecté dans la zone de perception est égale à la distance minimale, donc le piéton évite la collision avec le piéton voisin au lieu de maintenir son groupe.
- ii) la distance entre le piéton et un obstacle (l'un des frontières de l'environnement) est égale à la distance minimale, donc le piéton évite l'obstacle au lieu de maintenir le groupe.

Le comportement *RandomMove* reste toujours le comportement de faible priorité.

4.3.1 Comportement de mouvement aléatoire

Ce comportement est utilisé pour simuler le mouvement aléatoire de chaque agent. Le chemin de déplacement est le chemin tracé depuis la position actuelle vers une destination aléatoire, ce dernier est calculé par l'algorithme de Dijkstra ou l'algorithme A*. Ces deux algorithmes sont semblables, ils trouvent le plus court chemin du point de départ vers le point d'arrivée. Si l'agent atteint la nouvelle position, il se déplace vers une autre destination qui est générée de manière aléatoire.

- *Action* : Si l'agent n'est pas dans la zone de destination, il se dirige vers cette zone suivant le plus court chemin. Sinon, s'il arrive à sa destination, il se déplace vers une nouvelle destination qui est générée aléatoirement.

4.3.2 Comportement d'évitement

Ce comportement est utilisé pour simuler l'évitement d'obstacle et l'évitement de collision. Dans notre travail, à chaque pas de simulation chaque agent doit vérifier les futures collisions potentielles avec tous les autres agents de la foule et aussi les obstacles. Si une collision a été prédite, le type de cette collision doit être déterminé. Dans la réalité, il y a trois types de collisions possibles (figure 4.6).

- a. Collision face à face : se produit si les agents se déplacent l'un vers l'autre;
- b. Collision en arrière : quand l'agent est derrière un autre agent ou un obstacle;
- c. Collision de côté : se produit si les deux agents marchent presque dans la même direction;

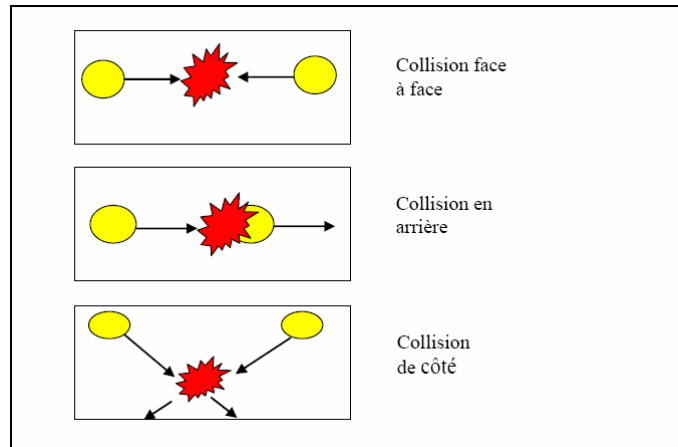


Figure 4.6 : Les trois types de collision (Cherif, 2006).

- *Action* : Les forces d'évitement des obstacles (murs) et des plus proches agents sont appliquées sur l'agent en question, et l'accélération (ou la décélération) est calculée, la vitesse est mise à jour et l'agent se déplace un pas selon la direction indiquée.

4.3.3 Comportement de maintien de groupe

Ce comportement intéresse aux personnes qui se déplacent en groupe, comme quelques amis ou un couple qui se rendent ensemble au même endroit. Il s'agit donc de groupes sociaux dans le sens littéral du terme, et non d'inconnus qui se retrouvent à marcher côte à côte par hasard. Nos observations montrent que la plupart du temps, le piéton n'est pas un marcheur solitaire. La majorité des piétons marchent en compagnie d'au moins une autre personne.

Dans notre travail, ce comportement permet à un agent de maintenir son groupe c'est à dire maintenir les structures intra-groupe et les relations inter-groupes pendant la simulation.

- *Action* : GP et GD et les deux vecteurs de vitesse *suivi* et *agrégation* sont calculés sur la base des connections intra-groupe et des relations inter-groupes. Le vecteur de vitesse globale est calculé par l'addition vectorielle des deux vecteurs précédents. L'agent se déplace avec la vitesse maximale prédéfinie dans la direction indiquée par le vecteur de vitesse globale. (GP et GD et les deux vecteurs de vitesse *suivi* et *agrégation* seront décrit dans la partie suivante).

5 Modélisation des structures de groupe

Cette partie présente les détails de notre modèle de groupe, pour faciliter la modélisation de groupe, on considère une foule de piétons comme une liste de groupes sociaux, dont chacun est identifié par un identificateur unique du groupe (*GroupId*), qui est attribué automatiquement au départ de la simulation. Chaque groupe contient une liste des individus, où chacun est identifié par un identificateur unique (*ID*). Chaque individu appartient à un et un seul groupe. On note que si un individu ne forme pas de groupe avec d'autres membres, on le considère comme un groupe seul. Le nombre total des individus dans un groupe est dénoté par la taille de groupe (*Groupe size*), tel que différents groupes peuvent avoir des tailles différentes. Il existe deux cas spéciaux concernant la taille de groupe :

- La taille de groupe égale à 1 c'est-à-dire chaque groupe contient un seul individu (dans ce cas aucune structure de groupe n'est considérée).
- La taille de groupe est égale au nombre d'individus dans la foule c'est-à-dire la foule entière se compose d'un seul groupe.

Un aspect important de modèle de groupe est d'étudier les relations dans la foule. Chaque groupe social est étudié sous deux aspects, les structures intra-groupe, et les relations inter-groupes. Les structures intra-groupe sont les relations entre les membres de même groupe, par exemple la similarité, familiarité,...etc. En d'un autre terme, les structures intra-groupe représentent l'influence de membre-à-membre dans un groupe. Par contre, les relations inter-groupes représentent les relations entre les groupes, par exemple : le phénomène suivre dans une foule de piétons. Clairement, les relations inter-groupes représentent l'influence de groupe-à-groupe dans une foule.

Dans un groupe social il existe deux rôles de l'individu, un chef ou un membre de groupe. On indique que chaque groupe possède un et un seul chef de groupe, le reste des individus sont les membres de groupe. Par défaut, le premier individu (dont l'identificateur *ID* est le plus petit dans son groupe) est le chef de ce groupe. Ce dernier est considéré comme un individu spécial, car il est le seul qui pourrait être influencé par les individus des autres groupes dus aux relations inter-groupes. Un membre de groupe peut être seulement influencé par d'autres membres de son groupe (le chef de groupe y inclut), ceci est dus aux structures intra-groupe.

Les différents individus dans un groupe s'influencent mutuellement, ces influences sont indiquées par une liste des nombres réels représentée par des matrices bidimensionnelles. Les structures intra-groupe sont spécifiées par une matrice intra-groupe, et les relations inter-groupes sont spécifiées par une matrice inter-groupes. Ces deux matrices capturent toutes les informations nécessaires pour spécifier les groupes de la foule.

On note que le but de ce modèle de groupe est de simuler des groupes sociaux statiques. Donc on suppose que les deux matrices intra-groupe et inter-groupes sont déterminées par l'utilisateur au début de la simulation. On suppose aussi que les groupes de la foule sont formés au démarrage de la simulation et ils ne sont pas modifiés pendant la simulation.

La modélisation de chaque individu (piéton) est inspirée par les travaux de Reynolds (1999), où les forces appliquées à un individu sont présentées par un ensemble de vecteurs. Ces vecteurs peuvent être facilement mis en œuvre. Dans notre modèle de foule, chaque individu possède quatre vecteurs de vitesse :

- un vecteur de vitesse pour exécuter le comportement d'évitement.
- un vecteur de vitesse pour exécuter le comportement de mouvement aléatoire.
- deux vecteurs de vitesse pour exécuter le comportement de maintien de groupe.

Chaque comportement de maintien de groupe est composé de deux aspects de mouvement: *agrégation* et *suivi*, qui permettent à un individu de maintenir ses structures intra-groupe et ces relations inter-groupes désirés. Ces deux aspects de mouvement sont représentés par deux vecteurs de vitesse, le vecteur d'*agrégation* et le vecteur de *suivi* respectivement.

- *Agrégation* signifie que l'individu dirige vers le centre des individus qui sont dans le même groupe qui ont des influences non nulles sur cet individu (tel que défini par la matrice intra-groupe). Ce centre est appelé la position de groupe, dénotée *GP* (groupe position) de cet individu.
- *Suivi* signifie deux choses :
 - Pour un membre de groupe, '*suivi*' signifie que le membre dirige vers la direction moyenne de déplacement des autres membres qui sont dans le même groupe, qui ont des influences non nulles sur ce membre. Ceci est similaire au comportement d'alignement présenté dans le travail de Reynolds (1999).

- Pour un chef de groupe, ‘suivi’ signifie que le chef suit la direction de déplacement d'un individu appartient à un groupe différent, ceci pour maintenir les relations inter-groupes.

Dans ces deux cas, la direction de déplacement associé à ‘suivi’ est appelée la direction de groupe, dénotée GD (group direction) de cet individu.

GP et GD sont deux paramètres essentiels dans le calcul des deux vecteurs *agrégation* et *suivi*.

5.1 Modélisation des structures intra-groupe

5.1.1 Matrice intra-groupe

La matrice intra-groupe est utilisée pour représenter l'influence de membre-à-membre dans un groupe. Dans ce modèle, chaque groupe a une matrice intra-groupe, c'est-à-dire les membres dans le même groupe partagent l'information globale d'influence. La matrice intra-groupe est un tableau de deux dimensions, dont chaque élément de cette matrice est un nombre réel dans l'intervalle $[0.0, 1.0]$. Le nombre de la ligne i et la colonne j noté $I(i, j)$ définit l'influence de piéton j sur le mouvement de piéton i à cause des structures intra-groupe. Par exemple, $I(i, j) = 0.0$ signifie que le piéton j n'a aucune influence sur le piéton i , et $I(i, j) = 1.0$ signifie que le piéton i est entièrement influencé par le piéton j . Donc une matrice intra-groupe avec tous les éléments égale à 0.0 représente le cas où les individus de même groupe n'ont aucune influence entre eux. Le tableau 4.2 montre un échantillon d'une matrice intra-groupe pour un groupe contient quatre piétons avec ID 0, 1, 2 et 3, Piéton_0 est le chef de groupe.

On peut voir dans le tableau 4.2, que le Piéton_1 est influencé par le Piéton_0, le Piéton_2 est influencé par le Piéton_1, le Piéton_3 est influencé par le Piéton_2 et le Piéton_0 (le chef) n'est pas influencé par les autres piétons. A cause de ces relations d'influence, le Piéton_3 suit le Piéton_2, ce dernier suit le Piéton_1 qui suit à son tour le Piéton_0 (le chef). Ce tableau définit un groupe linéaire.

ID	Piéton_0	Piéton_1	Piéton_2	Piéton_3
Piéton_0	Sans effet	0	0	0
Piéton_1	1	Sans effet	0	0
Piéton_2	0	1	Sans effet	0
Piéton_3	0	0	1	Sans effet

Tableau 4.2 : matrice intra-groupe simple.

Dans notre modèle tous les individus de groupe partagent la même matrice intra-groupe, c'est le cas où la taille de groupe est petite. Cependant, si le groupe devient dense (la taille de groupe augmente) les individus ne disposent pas des informations globales sur le groupe, donc ils ne partagent pas la même matrice intra-groupe. Dans ce cas, chaque individu a sa propre matrice intra-groupe basée sur sa propre vision de la structure de groupe, ceci n'est pas considéré dans notre modèle.

A part la matrice intra-groupe, on utilise trois paramètres pour décrire comment un piéton reste près des autres piétons de même groupe : *SideDist*, *CenterDist*, et *DesiredDist*.

- *SideDist* (sd) : est la distance perpendiculaire maximale entre le point *GP* et le trajectoire linéaire de l'individu.
- *CenterDist* (cd) : est la distance euclidienne* maximale entre le point *GP* et la position actuelle de l'individu.
- *DesiredDist* (dd) : est la distance désirée entre le point *GP* et la position actuelle de l'individu. C'est la distance maximale que l'individu veut maintenir pendant le déplacement.

A chaque pas de mouvement, les deux distances *SideDist* et *CenterDist* seront calculées. Seulement si *SideDist* est supérieure à *DesiredDist* le comportement de maintien de groupe de l'individu sera déclenché. Au cours de ce processus *SideDist* et *CenterDist* sont utilisées pour calculer la norme de vecteur d'agrégation. Ils accélèrent le mouvement d'agrégation, tant que la vitesse de déplacement ne dépasse pas la vitesse maximale prédéfinie.

5.1.2 Calcul de GP et GD pour les membres de groupe

GP est la position de groupe qu'un individu doit rapprocher, et *GD* est la direction moyenne de mouvement des autres membres de groupe qui ont des influences non nulles sur cet individu. Les équations (4.1) et (4.2) montrent comment calculer *GP* et *GD* pour chaque individu en fonction de la matrice intra-groupe, les positions et les vecteurs de vitesse des autres membres de groupe. Supposons que les éléments de la matrice intra-groupe sont notés $I(i, j)$, où i et j sont les *ID* de piétons i et j . N_i est le nombre total des membres de groupe qui sont dans la zone de perception de piéton i , on doit compter

* La Distance euclidienne ou Métrique euclidien est la distance ordinaire entre deux points qui peut être mesurer avec une règle.

seulement les piétons qui appartiennent au même groupe de piéton i . $CurrentPosition_j$ et $SpeedVector_j$ sont respectivement la position actuelle et le vecteur de vitesse de piéton j .

$$GP_i = \begin{cases} CurrentPosition_j & \text{si } j \text{ est le chef de groupe} \\ \left(\sum_{j=1}^{N_i} I(i, j) * CurrentPosition_j \right) / N_i & \text{si non} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$GD_i = \begin{cases} Direction_j & \text{si } j \text{ est le chef de groupe} \\ \left(\sum_{j=1}^{N_i} I(i, j) * SpeedVector_j \right) / N_i & \text{si non} \end{cases} \quad (4.2)$$

On note que les équations précédentes sont appliquées seulement aux membres de groupe. Pour un chef de groupe i , GP_i et GD_i sont respectivement la position et la direction de déplacement d'un individu appartient à un autre groupe. Le calcul de ces deux variables est basé sur les relations inter-groupes, ceci est décrit dans la partie suivante.

Pour les membres de groupe et le chef i , la direction de vecteur 'agrégation' est la direction de i vers GP_i . La direction de vecteur de 'suivi' est la direction indiquée par GD_i .

5.2 Modélisation des relations inter-groupes

5.2.1 Matrice inter-groupes

Plus les influences entre les membres de groupe, les différents groupes peuvent également influencer les uns sur les autres. A titre d'exemple, un groupe peut suivre d'autres groupes au cours d'un processus d'évacuation d'urgence à cause de l'absence d'évaluation objective des situations émergentes (Fridman et Kaminka, 2007). Dans notre travail, ce genre de relation inter-groupes est spécifié par une matrice inter-groupes. Similaire à la matrice intra-groupe, la matrice inter-groupes est un tableau à deux dimensions qui spécifie les relations de groupe-à-groupe. On note que la foule entière ne dispose qu'une seule matrice inter-groupes, tandis que chaque groupe peut être configuré avec une matrice intra-groupe différente.

Comme décrit précédemment dans la matrice intra-groupe, chaque élément dans la matrice inter-groupes est un nombre réel dans l'intervalle [0.0, 1.0]. L'élément de la ligne avec $GroupID$ i et de la colonne avec $GroupID$ j , noté $E(i, j)$ spécifie l'influence des individus de groupe j sur le groupe i (particulièrement le chef de ce groupe). La valeur 0.0 signifie que le groupe de la colonne n'influence pas sur le groupe de la ligne, même les deux groupes sont proches. La valeur 1.0 signifie que le groupe de la ligne est entièrement

influencé par le groupe de la colonne si les deux groupes sont proches. On note que la situation d'absence des relations inter-groupes peut être représenté par une matrice inter-groupes avec tous les éléments égaux à 0,0.

Le tableau 4.3 montre un échantillon d'une matrice inter-groupes pour une foule contient quatre groupes avec *GroupID* 0, 1, 2 et 3, chaque groupe influence entièrement sur l'autre (car tous les éléments de la matrice inter-groupes ont la valeur 1,0).

Sur la base des définitions de la matrice intra-groupe et la matrice inter-groupes, on peut voir qu'il existe deux façons pour spécifier une foule avec aucune structure de groupe :

- la foule entière est un seul groupe et les éléments de la matrice intra-groupe ont tous des valeurs nulles.
- chaque groupe de la foule contient un seul individu et les éléments de la matrice inter-groupes ont tous des valeurs nulles.

5.2.2 Calcul de GP et GD pour le chef de groupe

Comme mentionné précédemment, seulement le chef de groupe est influencé par les individus des autres groupes. L'objectif de la modélisation des relations inter-groupes est de permettre au chef de groupe de suivre un individu (qui a la plus grande influence sur le chef). Pour ce faire, on calcule l'influence de chaque individu sur le chef, et on compte seulement les individus des autres groupes. Dans ce travail, le calcul de l'influence est basé sur la théorie de la comparaison sociale de Festinger présentée dans les travaux de Fridman et Kaminka (2007). L'idée est de choisir l'individu avec la plus grande similarité comme celui qui a la plus grande influence sur le chef de groupe. Cette similarité dépend aux relations inter-groupes entre les deux groupes que le chef de groupe et l'individu appartiennent, et aussi à la distance euclidienne entre le chef et l'individu.

Groupe_ID	Groupe_0	Groupe_1	Groupe_2	Groupe_3
Groupe_0	Sans effet	1	1	1
Groupe_1	1	Sans effet	1	1
Groupe_2	1	1	Sans effet	1
Groupe_3	1	1	1	Sans effet

Tableau 4.3 : matrice inter-groupes simple.

Plus précisément, supposons que la matrice inter-groupes est notée E et chaque élément de la matrice est noté $E(G(i), G(j))$, où $G(i)$, $G(j)$ sont les identificateurs des groupes (*GroupID*) dont les piétons i et j appartiennent respectivement. Supposons que le piéton i est un chef de groupe, les équations (4.3)-(4.5) montrent la décision de ce chef (Qiu, 2010). Seulement les piétons dans la zone de perception du chef i qui appartiennent aux groupes différents sont considérés comme candidats. Pour chaque candidat j la similarité entre i et j est calculée selon l'équation (4.3). On peut voir que si les relations inter-groupes entre les deux groupes augmentent la distance entre i et j rapproche, et donc le chef i suit le piéton j . Les équations (4.4) et (4.5) montrent que le chef i sélectionne le piéton avec la plus grande valeur de similarité pour qu'il le suive.

$$Similarity_j = E(G(i), G(j)) * 100 / EuclidianDistBetween(i, j) \quad (4.3)$$

$$MostSimilarId = Maximum(Similarity_1, \dots, Similarity_n) \quad (4.4)$$

$$PedestrianToFollow = \begin{cases} Pedestrian\ with\ MostSimilar\ Id\ si\ MostSimilar\ existe & si\ non \\ \phi & \end{cases} \quad (4.5)$$

Une fois le piéton à suivre (*PedestrianToFollow*) est trouvé, les valeurs de GP_i et GD_i pour le chef i sont la position et la direction de déplacement de *PedestrianToFollow* respectivement. Si le chef i ne détecte aucune similarité, il ne suit aucun individu.

5.3 Calcul des paramètres de mouvement de l'agent

L'objectif de notre modèle de groupe est de calculer les deux vecteurs, le vecteur 'suivi' et vecteur 'agrégation', qui guident les piétons pour maintenir les structures intra-groupe et les relations inter-groupes. Cette partie montre comment calculer les deux vecteurs avec les valeurs de GP et GD .

La figure 4.7 montre les deux vecteurs 'suivi' et 'agrégation' de piéton s . On suppose que le piéton s se déplace horizontalement de droite vers la gauche, la région elliptique représente

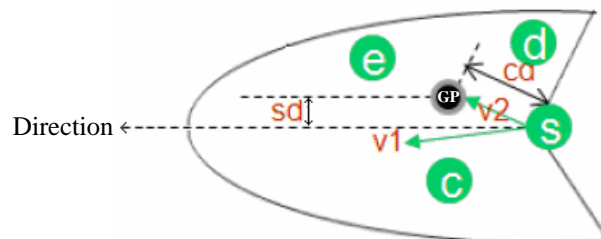


Figure 4.7 : Description des deux vecteurs *suivi* et *agrégation*.

la zone de perception de piéton s . Les piétons : c , d et e sont les voisins dans la zone de perception de piéton s , où les piétons c , d , e et s appartiennent au même groupe.

Le piéton s déplace vers la position de groupe GP_s . Les deux distances $CenterDist$ et $SideDist$ sont présentés dans la figure par cd et sd respectivement, v_1 et v_2 représentent les deux vecteurs de *suivi* et d'*agrégation* respectivement.

Il y a deux hypothèses :

- les voisins situés dans la zone de perception de piéton s sont c , d et e , qui ont des influences non nulles sur le piéton s .
- la direction de vecteur v_1 est la direction moyenne de déplacement des piétons voisins.

Les équations (4.6)-(4.8) montrent comment calculer le vecteur v_1 où : $Speed$ est la vitesse actuelle de déplacement de piéton s et a est la direction angulaire indiquée par GD_s (Qiu, 2010).

Le chef de groupe suit la direction de déplacement de $PedestrianToFollow$, tandis que le membre de groupe suit la direction moyenne de déplacement des piétons voisins dans sa zone de perception.

$$v_1 = factor * \langle Speed * \cos(a), Speed * \sin(a) \rangle \quad (4.6)$$

$$factor = \begin{cases} T & s \text{ est un chef de groupe} \\ 1.0 & s \text{ est un membre de groupe} \end{cases} \quad (4.7)$$

$$T = \begin{cases} 0.0 & Si PedestrianToFollow = \phi \\ 1.0 & si non \end{cases} \quad (4.8)$$

Le calcul de vecteur v_2 est montré dans les équations (4.9)-(4.12) (Qiu, 2010) où :

- pour un membre de groupe, a est la direction angulaire de piéton s vers GP_s . Pour un chef de groupe, a est la direction angulaire de ce chef vers le piéton le plus similaire dans un autre groupe ($PedestrianToFollow$).
- $factor$ est calculé selon deux équations. Si le piéton s est un chef de groupe, le facteur est calculé selon l'équation (4.11), sinon il est calculé selon l'équation (4.10).
- la distance euclidienne entre s et $PedestrianToFollow$ est notée $dist$.

$$v_2 = factor * \langle Speed * \cos(a), Speed * \sin(a) \rangle \quad (4.9)$$

$$factor = \begin{cases} cd / CenterDist & \text{si } cd > CenterDist \\ sd / SideDist & \text{si } cd \leq CenterDist \text{ et } sd > SideDist \\ 0.0 & \text{si non} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$factor = \begin{cases} E * 20 * DesiredDist / dist & \text{si } PedestrianToFollow \neq \phi \\ 0.0 & \text{si non} \end{cases} \quad (4.11)$$

$$E = E(G(s), G(PedestrianToFollow)) \quad (4.12)$$

$$v = v_1 + v_2 \quad (4.13)$$

Le vecteur de vitesse global v , qui conduit le comportement de maintien de groupe, est égal à l'addition vectorielle de v_1 et v_2 comme montre l'équation (4.13). Chaque piéton s déplace vers la position de groupe GP_s avec la direction GD_s pour maintenir la distance $DesiredDist$. De cette façon, les structures intra-groupe et les relations inter-groupes peuvent être maintenus.

6 Etude des cas : Les formes de groupes sociaux

En utilisant notre cadre de modélisation, nous démontrons trois formes de groupes sociaux : une forme de groupe linéaire, une forme de suivi de chef de groupe et une forme de groupe mixte.

Dans le groupe linéaire, les membres de même groupe se déplacent suivant une droite où chaque membre suit un membre de son groupe. La matrice intra-groupe I , définie dans l'équation (4.14), indique que le membre i suivra le membre j possédant un identificateur ID plus petit que l'identificateur ID de membre i

$$I(i, j) = \begin{cases} c & \text{si } i \neq 0 \text{ et } j = i - 1 \\ 0.0 & \text{si non} \end{cases} \quad (4.14)$$

Dans la forme de suivi de chef de groupe, les membres suivent le chef de groupe durant le mouvement. La matrice intra-groupe I , définie dans l'équation (4.14), indique que tous les membres de groupe se déplacent vers le chef.

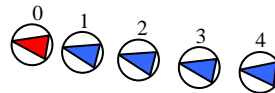
$$I(i, j) = \begin{cases} c & \text{si } i \neq 0 \text{ et } j = 0 \\ 0.0 & \text{si non} \end{cases} \quad (4.15)$$

Dans les équations (4.14) et (4.15), c est un nombre réel positif défini dans l'intervalle $[0,0, 1,0]$, qui indique l'influence de membre-à-membre. Dans les deux formes de groupes, le chef de groupe trouve le chemin et se déplace pour le suivre. Les figures (4.8), (4.9) et (4.10) montrent trois groupes, linéaire, suivi de chef et mixte (respectivement). Cinq agents avec des ID de 0 à 4 sont inclus dans chaque groupe, l'agent avec ID 0 est le chef de groupe. Pour chaque groupe, la matrice intra-groupe (figures (4-8)-(4.10) (a)) et le scénario de simulation (figures (4.8)-(4.10) (b)) sont donnés. Ces trois figures montrent comment utiliser une matrice intra-groupe pour présenter le groupe désiré, et utiliser le cadre proposé pour le simuler.

Le groupe mixte est composé de deux sous-groupes suivi de chef et linéaire. Dans la figure (4.9), les agents avec les ID 0, 1 et 2 forment un sous-groupe linéaire lorsque l'agent 2 suit l'agent 1 et l'agent 1 suit l'agent 0. Tandis que les agents 2, 3 et 4 forment un sous-groupe de suivi de chef où les agents 3 et 4 suivent l'agent 2.

ID	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0
3	0	0	1	0	0
4	0	0	0	1	0

(a) matrice intra-groupe

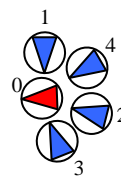


(b) scénario de simulation

Figure 4.8 : La forme de groupe linéaire.

ID	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0

(a) matrice intra-groupe

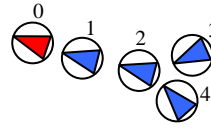


(b) scénario de simulation

Figure 4.9: La forme de suivi de chef de groupe.

ID	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0
3	0	0	1	0	0
4	0	0	1	0	0

(a) matrice intra-groupe



(b) scénario de simulation

Figure 4.10 : La forme de groupe mixte.

7 Conclusion

Ce chapitre se focalise sur la conception détaillée de notre système de simulation d'une foule de piétons, où la foule est considérée comme étant un ensemble de groupe de piétons, et les relations inter et/ou intra groupe sont définies préalablement par l'utilisateur. Tout d'abord, nous avons proposé l'architecture de notre cadre de modélisation des structures de groupe, la vue d'ensemble de l'architecture en couches de ce cadre est introduite suivie de la description détaillée de chaque couche. Le modèle de perception, le modèle de comportement de l'agent et ses mécanismes de travail sont également introduits dans la première partie. La partie suivante présente la couche de modélisation de groupe (la couche la plus importante), nous avons décrit en détails les paramètres importants de groupe ainsi que la modélisation des structures intra-groupe et des relations inter-groupes.

Enfin pour conclure nous avons modélisé, comme une étude de cas, trois formes de groupes sociaux : la forme de groupe linéaire, la forme de suivi de chef de groupe et la forme de groupe mixte. L'implémentation de notre système de simulation et les algorithmes de fonctionnement utilisés ainsi que les résultats obtenus seront traités dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Résultats et validation

1	Introduction.....	86
2	Architecture du système proposé	86
3	Algorithmes de base.....	91
4	Validation du système implémenté.....	101
5	Conclusion	111

1 Introduction

Après avoir étudié les détails de notre modèle, et présenter la conception détaillée de notre système de modélisation des structures de groupes d'une foule de piétons. Nous présentons dans ce chapitre l'implémentation du système dans l'environnement OpenSteer en utilisant le langage C++ et la bibliothèque graphique OpenGL. Nous avons introduit le chapitre par l'architecture globale du système proposé suivi par une vue sur les comportements exécutés par chaque piéton de la foule. Puis nous avons cité les algorithmes de base utilisés pour exécuter ces comportements, plus précisément le comportement de maintien de groupe. Nous donnons par la suite un aperçu des résultats graphiques et de simulations suivant différents scénarios, et ceci pour montrer l'effet du groupement des piétons sur le mouvement de la foule à savoir : l'effet des structures intra-groupe et des relations inter-groupes. Pour valider nos résultats, nous présentons pour chaque cas une comparaison des résultats obtenus avec des travaux similaires.

2 Architecture du système proposé

Notre système de simulation d'une foule des piétons est décrit comme un couple \langle Environnement, Foule \rangle . Environnement décrit l'environnement de simulation où les agents interagissent les uns avec les autres. Foule décrit une foule des piétons spécifiques.

L'environnement de simulation inclut des primitives de simulation tels que les informations des obstacles, par exemple : la forme, la taille, la position. Les obstacles sont des entités fixes qui ne se déplacent pas pendant la simulation. Dans notre modèle les obstacles sont les murs, donc ils présentent les frontières de mouvement des piétons.

La foule des piétons est décrit comme \langle {Groupes}, relations inter-groupes \rangle , et le groupe est décrit comme \langle {Agents}, structures intra-groupe \rangle . Ici, {Agents} indique un ensemble de piétons (un chef et des membres) appartiennent au même groupe (figure 5.1).

Les structures intra-groupe et les relations inter-groupes sont définies par deux matrices : la matrice intra-groupe et la matrice inter-groupes (respectivement). Ces deux matrices capturent toutes les informations nécessaires pour spécifier les groupes dans la foule. Chaque groupe possède une matrice intra-groupe et la foule entière possède une seule matrice inter-groupe tel que les éléments des deux matrices sont des nombres réels dans l'intervalle $[0,1]$.

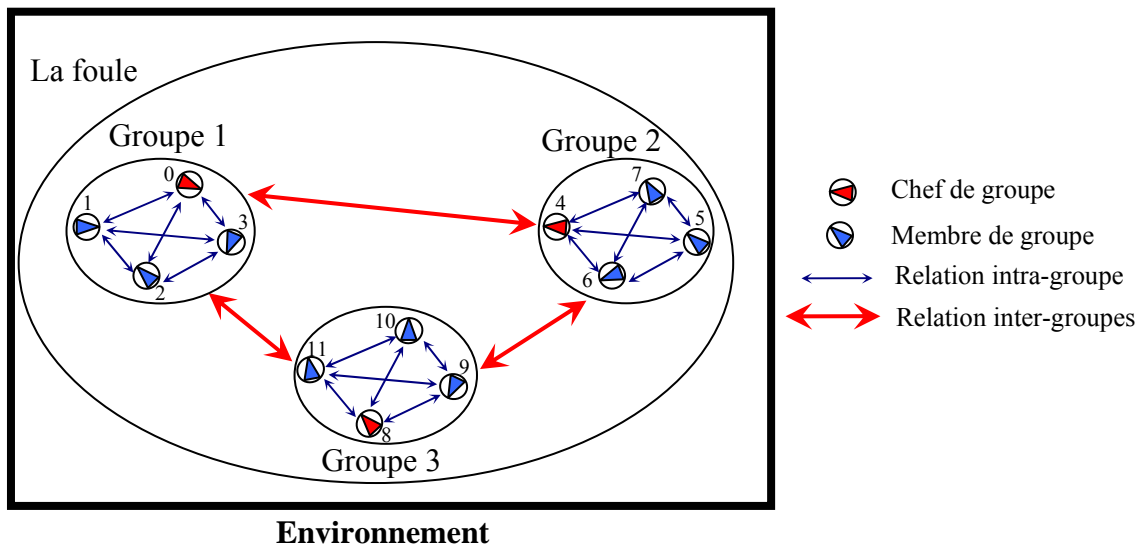


Figure 5.1 : Architecture de notre système : exemple d'une foule composée de trois groupes avec quatre individus par groupe.

Pour des raisons de simplicité, nous avons définie dans notre modèle le type statique des relations c'est-à-dire les relations intra et inter groupes reste inchangeables pendant la simulation. Par conséquent, nous avons définie les matrices intra et inter groupes au démarrage de la simulation, pour simplifier encore la tâche nous avons définie la même matrice intra-groupe pour tous les groupes de la foule.

Pour implémenter notre système de modélisation des structures de groupes d'une foule de piétons, nous avons utilisé la plate-forme Opensteer de Reynolds (2004) qui contient plusieurs plugins. En effet, nous avons choisi le plugin 'Pedestrians' et avons ajouté quelques caractéristiques à l'agent pour définir un nouveau comportement dans la bibliothèque des comportements de direction existante, qui est le comportement de maintien de groupe.

Dans notre modèle de foule, chaque agent est décrit par $\langle ID, Role, CurrentPosition, Speed, Forward, SpeedVector, Radius, PerceptionModel, BehaviorModel... \rangle$ où :

- *ID* est l'identificateur unique de l'agent.
- *Role* spécifie le rôle de cet agent : chef ou membre de groupe. Par défaut, le premier agent avec l'identificateur *ID* le plus petit dans le groupe est le chef de ce groupe (figure 5.1).
- *CurrentPosition* spécifie la position actuelle de l'agent.

- *Speed* spécifie la vitesse actuelle de l'agent. Au début de simulation, la vitesse initiale égale à 0 puis elle augmente progressivement jusqu'à la valeur maximale (*SpeedMax*), et reste ensuite constante jusqu'à la fin.
- *Forward* spécifie la direction de l'agent.
- *SpeedVector* spécifie le vecteur de vitesse de l'agent qui est défini par deux choses : la vitesse de déplacement et la direction de l'agent.
- Chaque agent est une forme circulaire dont le rayon est spécifié par *Radius*.
- *PerceptionModel* spécifie la liste des piétons détectés dans la zone de perception.
- *BehaviorModel* spécifie les comportements exécutés par l'agent.

Dans notre système chaque agent (piéton) exécute trois comportements : *RandomMove*, *Avoid* et *MaintainGroup* (le comportement de mouvement aléatoire, le comportement d'évitement et le comportement de maintien de groupe, respectivement). *RandomMove* permet au piéton de se déplacer d'une manière aléatoire autour de l'environnement de simulation. *Avoid* permet au piéton d'éviter les obstacles et la collision avec d'autres piétons. *MaintainGroup* permet au piéton de maintenir son groupe.

Dans notre système, nous avons utilisé le mécanisme d'inhibition des comportements, c'est-à-dire à chaque pas de simulation un seul comportement est sélectionné pour contrôler le mouvement de l'agent. Le comportement exécuté par l'agent possède la priorité la plus élevée, on note que notre travail s'intéresse aux groupes sociaux donc parmi ces trois comportements le plus prioritaire est le comportement de *MaintainGroup*.

On trouve que le comportement *Avoid* devient prioritaire à *MaintainGroup* dans deux cas : la distance entre le piéton et un autre piéton voisin où la distance entre le piéton et un mur (un des frontières de l'environnement) est égale à la distance minimale. Par contre, le comportement *RandomMove* reste toujours le comportement le moins prioritaire.

L'interaction entre les piétons et l'environnement de simulation est réalisée chaque pas de temps par le processus de «perception-décision-mouvement» montré dans la figure 5.2. Dans ce processus, chaque piéton perçoit l'environnement par son modèle de perception, il détecte les piétons et les obstacles voisins par la suite il décide quel comportement va exécuter. Une fois la décision est réalisée, la direction de déplacement et la vitesse sont calculés et donc ce piéton effectue le mouvement.

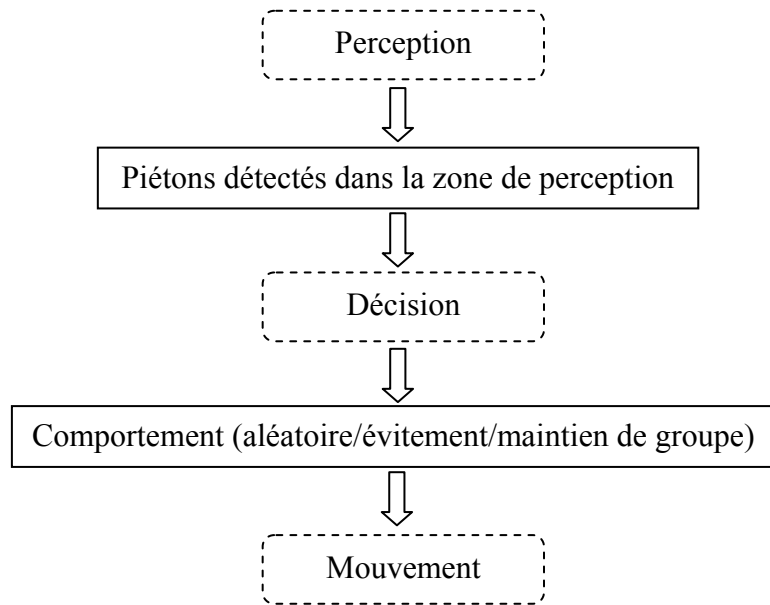


Figure 5.2 : Processus exécuté par chaque piéton.

Exemples d'exécutions :

Les figures (5.3)-(5.7) montrent des exemples d'exécutions des trois comportements à savoir : le comportement de mouvement aléatoire (figure 5.3), le comportement d'évitement de collision et d'obstacles (figure 5.4 et 5.5 respectivement) et le comportement de maintien de groupe (figure 5.6 et figure 5.7).

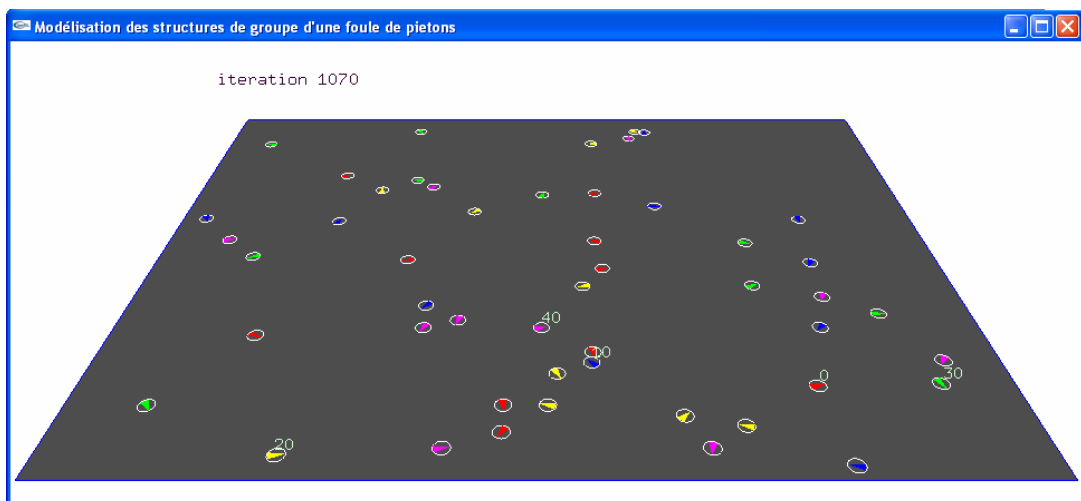


Figure 5.3 : Le comportement de mouvement aléatoire.

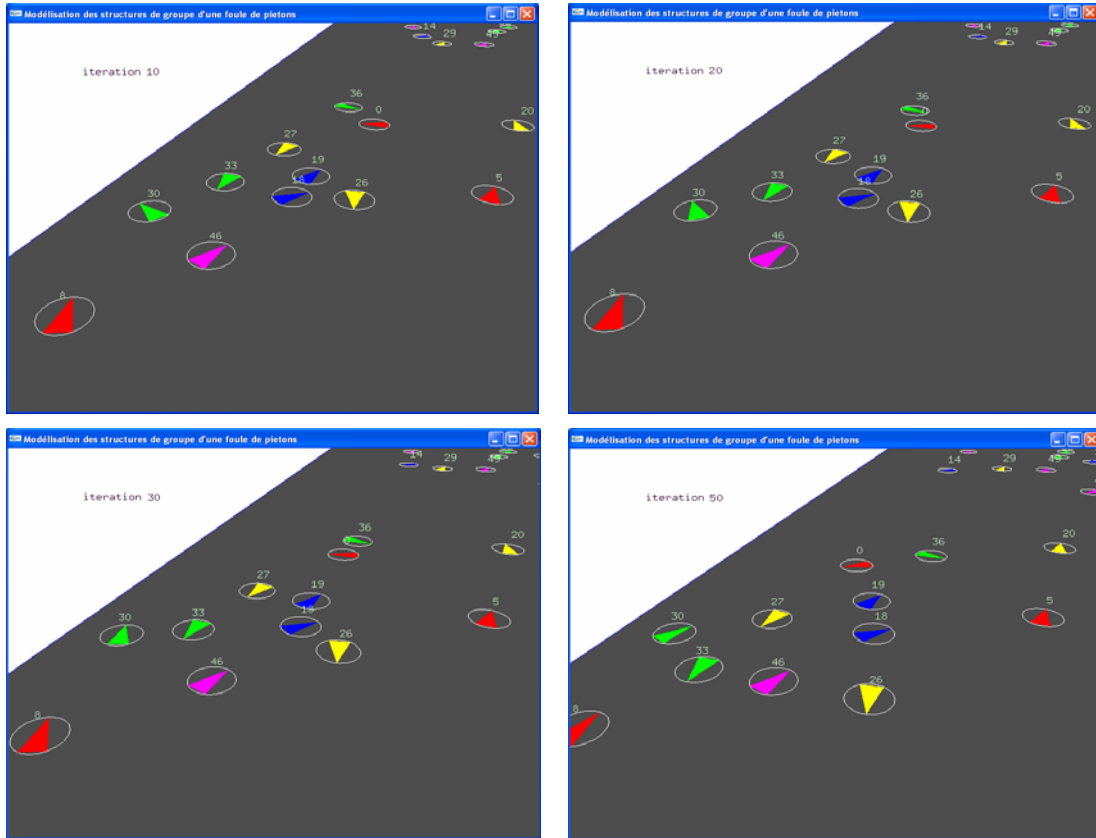


Figure 5.4 : Le comportement d'évitement d'obstacle exécuté par le piéton n°30.

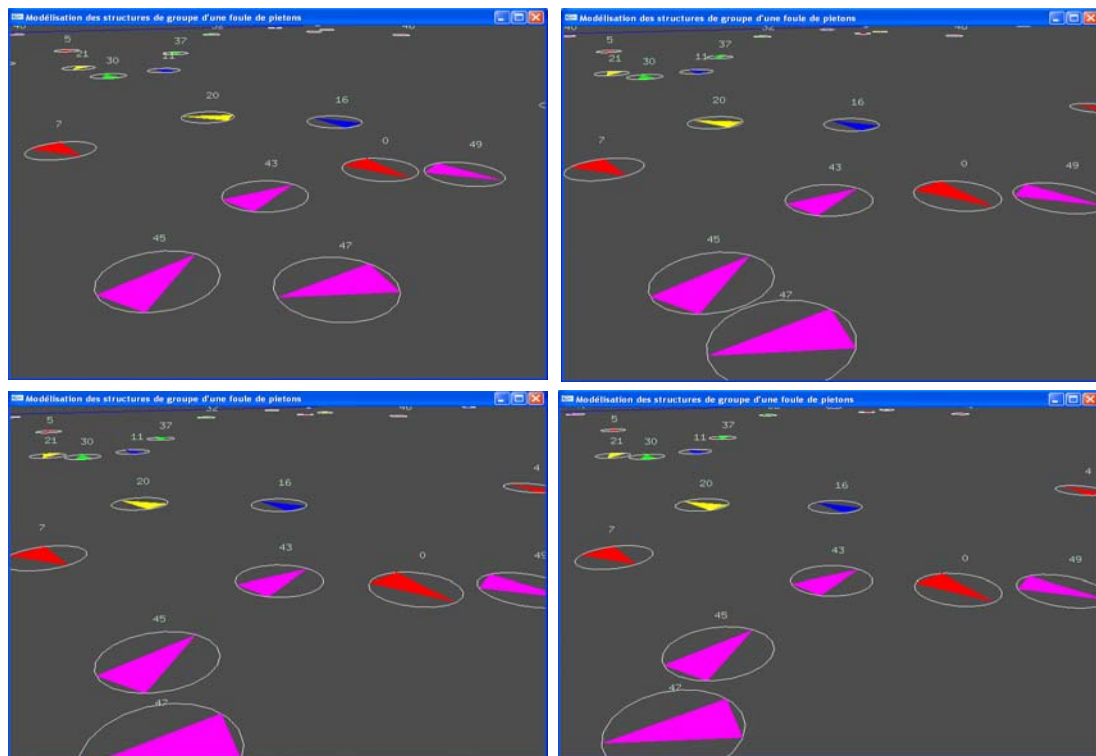


Figure 5.5 : Le comportement d'évitement de collision entre les piétons n°45 et n°47.

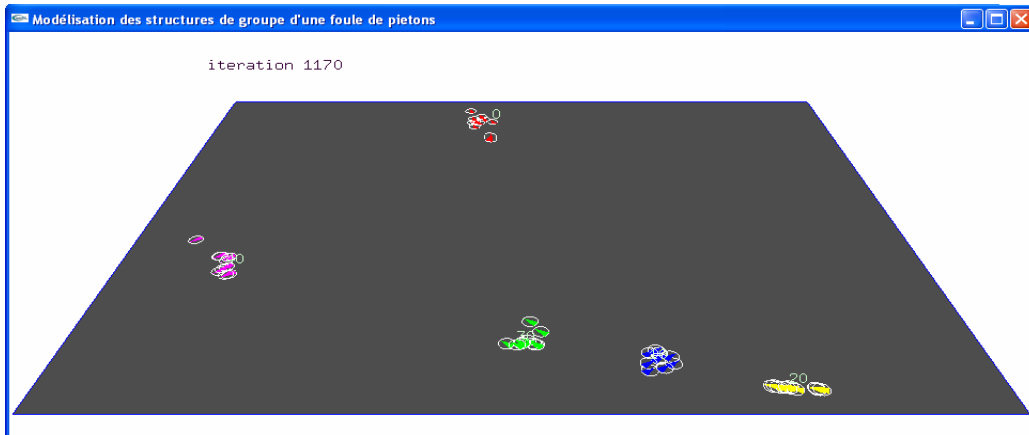


Figure 5.6 : Le comportement de maintien des structures intra-groupe.



Figure 5.7 : Le comportement de maintien des relations inter et intra groupes.

3 Algorithmes de base

Dans notre modèle de foule, chaque agent possède quatre vecteurs de vitesse :

- Un vecteur de vitesse pour exécuter le comportement d'évitement.
- Un vecteur de vitesse pour exécuter le comportement de mouvement aléatoire.
- Deux vecteurs de vitesse pour exécuter le comportement de maintien de groupe.

Chaque comportement de maintien de groupe est composé de deux aspects de mouvement : *agrégation* et *suite*, qui permettent à un agent de maintenir les structures intra-groupe et les relations inter-groupes désirés. Ces deux aspects de mouvement sont représentés par deux vecteurs de vitesse, le vecteur *agrégation* et le vecteur *suite* respectivement.

Chaque agent exécute le processus présenté dans la figure 5.8 pour calculer le vecteur de vitesse globale qui exécute le comportement de maintien de groupe.

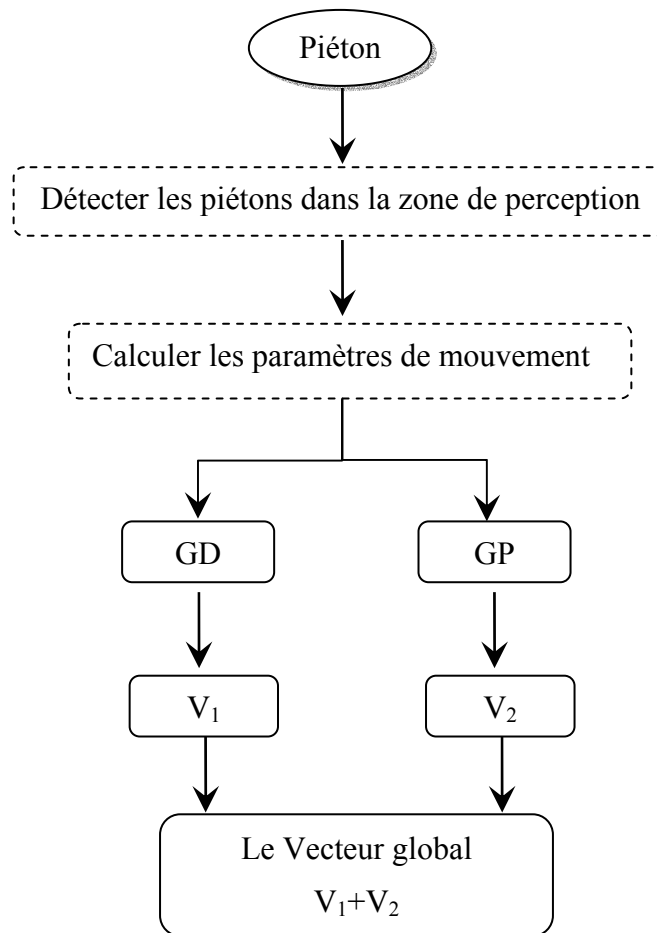


Figure 5.8 : Processus exécuté par le piéton pour calculer le vecteur de maintien de groupe.

La partie suivante représente les algorithmes de base utilisés pour calculer les deux vecteurs de maintien de groupe *suite* et *agrégation* (v_1 et v_2 respectivement) en se basant sur les valeurs de GP et GD.

3.1 Détection des piétons dans la zone de perception

L'agent peut détecter seulement les piétons voisins et les obstacles dans la zone de perception. Dans notre modèle, la zone de perception de l'agent est définie par une zone elliptique proche du champ visuel humain. La définition de la zone de perception est définie dans la figure 5.9, où la direction actuelle de déplacement de l'agent est indiquée par '*Direction*', la distance devant maximale et la distance latérale sont indiquée par *dist1* et *dist2* respectivement. *Angle* indique la moitié de l'angle de vue maximale détectée par le piéton. Cet algorithme est exécuté par tous les piétons de la foule (les chefs et membres des groupes) dans chaque pas de simulation.

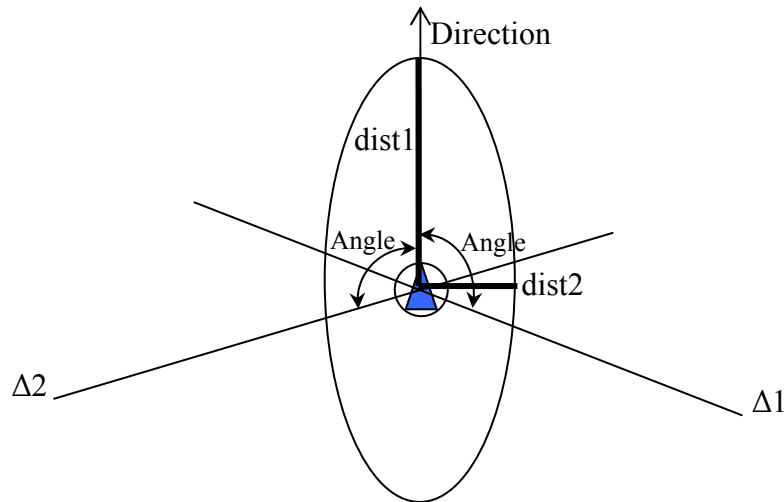


Figure 5.9 : Définition de la zone de perception.

Dans notre modèle : $dist1$, $dist2$ et $angle$ sont $20 * Radius$, $6 * Radius$ et 110° respectivement (on rappelle que chaque agent est une forme circulaire dont le rayon est spécifié par $Radius$).

Entrée : l'identificateur de piéton.

Sortie : la liste des piétons détectés dans la zone de perception.

Algorithme_Détection_Zone_Perception (Piéton i)

Début

i = l'identificateur de piéton ;

E = équation de l'ellipse entourant le piéton i , définie par les rayons $dist1$ et $dist2$;

$\Delta1$ = équation de la droite formant 110° à partir de la direction de piéton i vers la droite ;

$\Delta2$ = équation de la droite formant 110° à partir de la direction de piéton i vers la gauche ;

Ensemble_1 = tous les piétons à l'intérieur de l'ellipse (E) ;

Ensemble_2, 3 = tous les piétons de Ensemble_1 au dessus de $\Delta1$ et $\Delta2$ (Respectivement) dans le sens de direction de piéton i ;

Zone_de_perception = Ensemble_2 \cup Ensemble_3 ;

Return (Zone_de_perception) ;

Fin

Exemple d'exécution

Les figures 5.10 montrent un exemple de l'utilisation de l'algorithme de détection des piétons dans la zone de perception du piéton n°9. A l'itération 35, ce dernier a détecté un seul piéton (n°44). Nous remarquons qu'à l'itération 57, ce même piéton n'a rien détecté

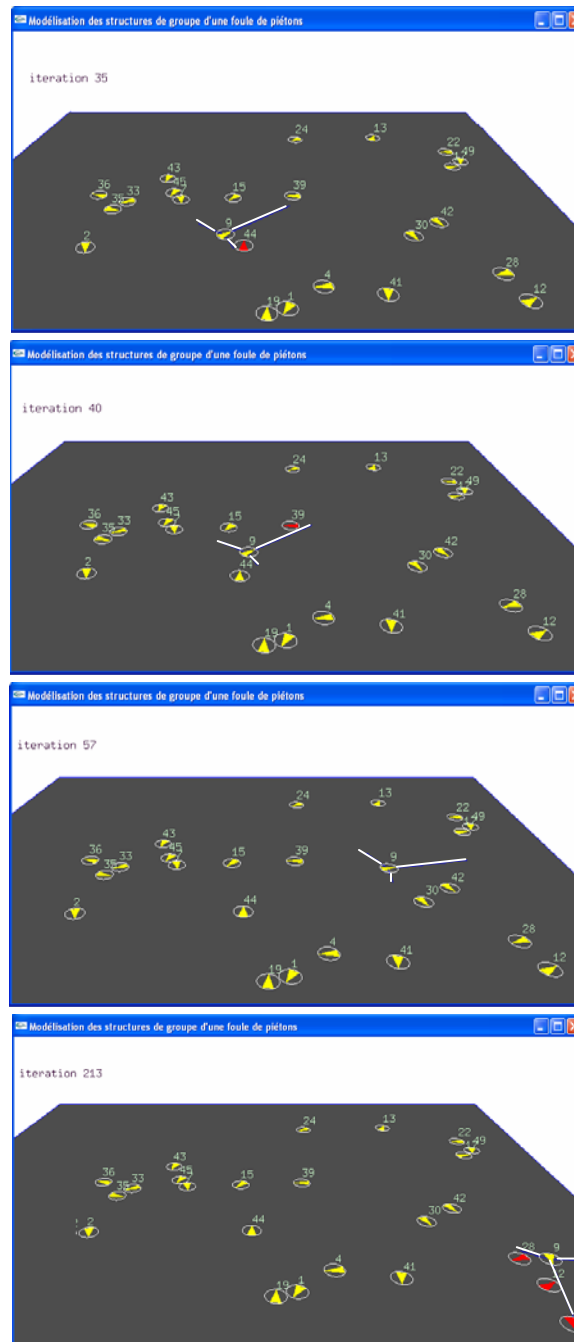


Figure 5.10 : les piétons détectés dans la zone de perception du piéton n°9.

vue que la zone de perception est vide. Nous avons présenté également un cas où on détecte trois autres piétons (itération 213).

3.2 Sélection de piéton à suivre

Cet algorithme est exécuté par les chefs des groupes. Chaque chef cherche dans sa zone de perception le piéton qui appartient à un groupe différent et possède la plus grande influence sur ce chef. Le chef suit le piéton sélectionné pour maintenir les relations inter-groupes.

Entrée : l'identificateur de chef.

Sortie : l'identificateur de piéton à suivre.

Algorithme_Sélection_Piéton_à_Suivre (piéton i)

Début

i = l'identificateur de piéton ;

Si (le piéton i est un chef) **alors**

 Piéton_à_suivre = \emptyset ;

 Plus_Similaire = 0 ;

 E = Matrice inter-groupes ;

 Liste = tous les piétons dans la zone de perception de i ;

Pour (chaque piéton j dans Liste) **faire**

début

Si (groupe(i) \neq groupe(j)) **alors**

début

 Distance = distance euclidienne entre i et j ;

 Similaire = E [groupe(i), groupe(j)] * 100 / Distance ;

Si (Similaire > Plus_Similaire)

début

 Plus_Similaire = Similaire ;

 Piéton_à_suivre = j ;

fin

fin

fin

fin

Return (Piéton_à_suivre) ;

Fin

Exemple d'exécution

Les figures 5.11 montrent un exemple d'application de l'algorithme de sélection de piétons à suivre par chaque chef de groupe. Sur ces figures, les chefs des groupes sont colorés en rouge et les piétons à suivre en bleue. A l'itération 699 par exemple, nous observons que le chef du cinquième groupe (n°40) a détecté d'abord deux piétons (n°43 et n°23) dans sa zone de perception. Ce même chef sélectionne par la suite le piéton n°23 comme étant le piéton à suivre puisqu'il appartient à un autre groupe. Nous montrons également deux

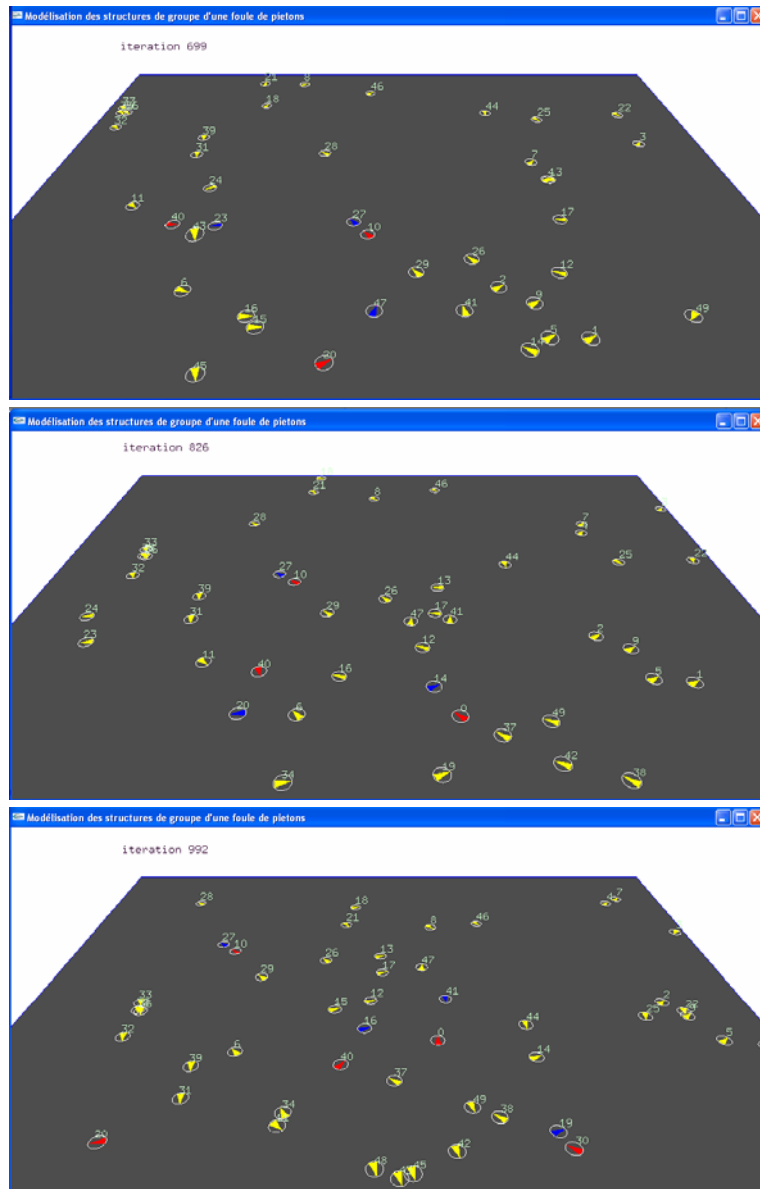


Figure 5.11 : Sélection des piétons à suivre.

autres itérations (826 et 992) où ce chef a choisi de suivre respectivement un piéton du troisième groupe (n°20) puis un piéton du deuxième groupe (n°16).

3.3 Calcul de GP

Le piéton se déplace vers la position de groupe (GP) pour maintenir les relations intra-groupe. Cette position est calculée selon le rôle de piéton :

- un chef de groupe, GP est la position actuelle de piéton à suivre.
- Un membre de groupe, GP est la position actuelle du chef de groupe si ce membre a détecté le chef de son groupe dans la zone de perception. Sinon GP est la position

moyenne des piétons détectés dans la zone de perception qui sont dans le même groupe et ont des influences non nulles sur ce membre.

Entrée : l'identificateur de piéton.

Sortie : la position de groupe (GP) de ce piéton.

Algorithme_Calcul_GP (piéton i)

Début

i = l'identificateur de piéton ;

Si (le piéton i est un chef) **alors**

début

Piéton_à_suivre = Sélection_Piéton_à_Suivre (i);

Si (Piéton_à_suivre $\neq \emptyset$) **alors**

GP = la position actuelle de Piéton_à_suivre;

Sinon

GP = la future position de piéton i ;

fin

Sinon

début

Somme = 0 ;

Liste_voisinages = tous les piétons dans la zone de perception de i qui ont des influences non nulles sur i ;

M = Matrice intra-groupe ;

Ni = le nombre de piétons dans Liste_voisinages ;

Pour (chaque piéton j dans Liste_voisinages) **faire**

début

Si (groupe(i) = groupe(j)) **alors**

Somme = Somme + (M[groupe(i)] [groupe(j)] * PositionActuelle $_j$;

GP = Somme / Ni ;

fin

fin

Return (GP) ;

Fin

3.4 Calcul de GD

Le piéton se déplace vers la position GP avec une direction de mouvement GD pour maintenir les relations intra-groupe. Cette dernière est calculée selon le rôle de piéton :

- un chef de groupe, GD est la direction de mouvement de piéton à suivre.
- Un membre de groupe, GD est la direction de mouvement du chef de groupe si ce membre a détecté le chef de son groupe dans la zone de perception. Sinon GD est la direction de mouvement moyenne des piétons détectés dans la zone de perception qui sont dans le même groupe et ont des influences non nulles sur ce membre.

Entrée : l'identificateur de piéton.

Sortie : la direction de groupe de ce piéton.

Algorithme_Calcul_GD (piéton i)

Début

i = l'identificateur de piéton ;

Si (le piéton i est un chef) **alors**

début

Piéton_à_suivre = Sélection_Piéton_à_Suivre (i);

Si (Piéton_à_suivre $\neq \emptyset$) **alors**

GD = la direction de mouvement de Piéton_à_suivre ;

Sinon

GD = la direction de mouvement de piéton i ;

fin

Sinon

début

Somme = 0 ;

Liste_voisinages = tous les piétons dans la zone de perception de i qui ont des influences non nulles sur i ;

M = Matrice intra-groupe ;

Ni = le nombre de piétons dans Liste_voisinages ;

Pour (chaque piéton j dans Liste_voisinages) **faire**

début

Si (groupe(i) = groupe(j)) **alors**

début

SpeedVector $_j$ = Vitesse_actuelle $_j$ * Direction $_j$;

Somme = Somme + (M[groupe(i)] [groupe(j)] * SpeedVector $_j$;

fin

GD = Somme / Ni ;

fin

fin

Return (GD) ;

Fin

3.5 Calcul de V_1

Cet algorithme est exécuté si le comportement de maintien de groupe est déclenché. Le vecteur v_1 présente l'aspect de mouvement 'suite' qui guide le piéton de se déplacer avec la direction GD vers la position GP.

Entrée : l'identificateur de piéton.

Sortie : le vecteur 'suite' de ce piéton.

Algorithme_Calcul_V1 (piéton i)

Début

i = l'identificateur de piéton ;

Si (le piéton i est un chef) **alors**

début

j = Sélection_Piéton_à_Suivre (i);

Si ($j = \emptyset$) **alors**

$T = 0.0$;

Sinon

$T = 1.0$;

Facteur = T ;

a = la direction angulaire de piéton i vers le piéton j ;

fin

Sinon

début

Facteur = 1.0 ;

GD = calcul_GD (i) ;

a = la direction angulaire indiquée par GD ;

fin

V_1 = facteur * \langle vitesse $_i$ * cos (a), vitesse $_i$ * sin (a) \rangle ;

Return (V_1) ;

Fin

3.6 Calcul de V_2

Cet algorithme est exécuté si le comportement de maintien de groupe est déclenché. Le vecteur v_2 présente l'aspect de mouvement 'agrégation' qui guide le piéton de se déplacer vers la position de groupe GP.

Entrée : l'identificateur de piéton.

Sortie : le vecteur ‘agrégation’ de ce piéton.

Algorithme_Calcul_V2 (piéton i)

Début

i = l’identificateur de piéton ;

E = Matrice inter_groupe ;

Si (le piéton i est un chef) **alors**

début

j = Sélection_Piéton_à_Suivre (i);

Si ($j = \emptyset$) **alors**

Facteur = 0.0 ;

Sinon

début

$E = E[\text{groupe}(i)][\text{groupe}(j)]$;

Dist = Distance euclidienne entre les piétons i et j ;

Facteur = $E * 20 * \text{DesiredDist} / \text{Dist}$;

fin

a = la direction angulaire de piéton i vers le piéton j ;

fin

Sinon

début

Si ($cd > \text{CenterDist}$) **alors**

Facteur = $cd / \text{CenterDist}$;

Sinon

Si ($cd \leq \text{CenterDist}$ et $sd > \text{SideDist}$) **alors**

Facteur = $sd / \text{SideDist}$;

Sinon

Facteur = 0.0 ;

GP = calcul_GP (i) ;

a = la direction angulaire de piéton i vers GP ;

fin

$V_2 = \text{facteur} * \langle \text{vitesse}_i * \cos(a), \text{vitesse}_i * \sin(a) \rangle$;

Return (V_2) ;

Fin

4 Validation du système implémenté

4.1 Effet du groupement de piétons sur le comportement de la foule

La figure 5.12 montre une simulation de la foule sans introduire aucune structure de groupes. C'est-à-dire, nous ignorons dans ce cas les relations intra et inter groupes, et la figure 5.13 montre une simulation de la foule avec structure de groupes.

Pour montrer l'effet des groupement des piétons c'est-à-dire l'impact des relations intra et inter groupes sur le comportement de la foule, nous considérons dans ce qui suit une foule de piétons de 50 individus groupés dans 5 groupes qui contiennent chacun 10 individus.

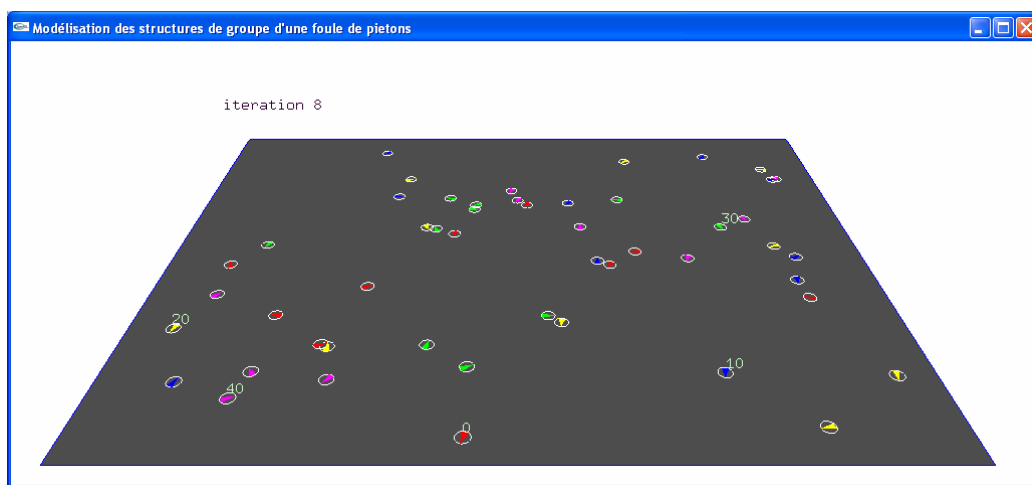


Figure 5. 12 : Simulation de la foule sans structures de groupes.



Figure 5. 13 : Simulation de la foule avec structures de groupes.

4.1.1 Impact des relations intra-groupe

Pour montrer l'impact des relations intra-groupe, nous considérons quatre matrices intra-groupe avec tous les éléments égaux à : i) 1.0, ii) 0.7, iii) 0.4 et iv) 0.1. Ainsi, pour montrer l'effet exclusif des relations intra-groupe, nous avons éliminé les relations entre les groupes en appliquant une matrice inter-groupes de valeurs nulles, 0.0.

Nous avons quantifié l'impact des relations intra-groupe par la distance moyenne entre le chef du premier groupe et les membres de ce même groupe. Cette distance est calculée pour les quatre matrices intra-groupe pendant un même ordre d'intervalle de simulation.

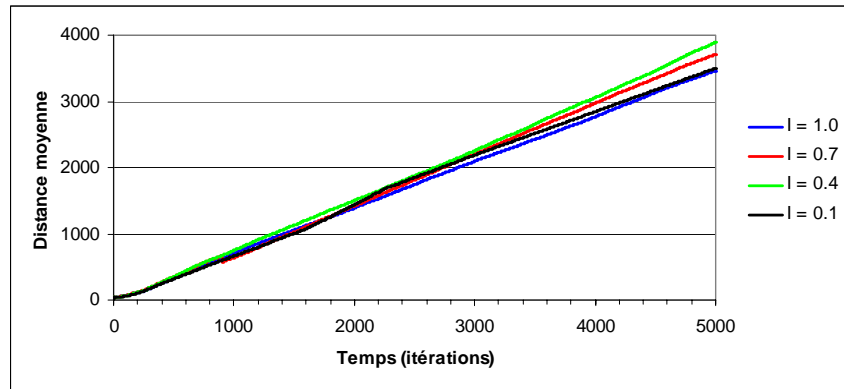
Nous présentons dans la suite différents scénarios pour visualiser l'impact des relations intra-groupe, à savoir :

- Scénario 1 : une foule de piétons dans un environnement ouvert sans évitement de collision.
- Scénario 2 : une foule de piétons dans un environnement fermé sans évitement de collision.
- Validation : une foule de piétons dans un environnement fermé avec évitement de collision.

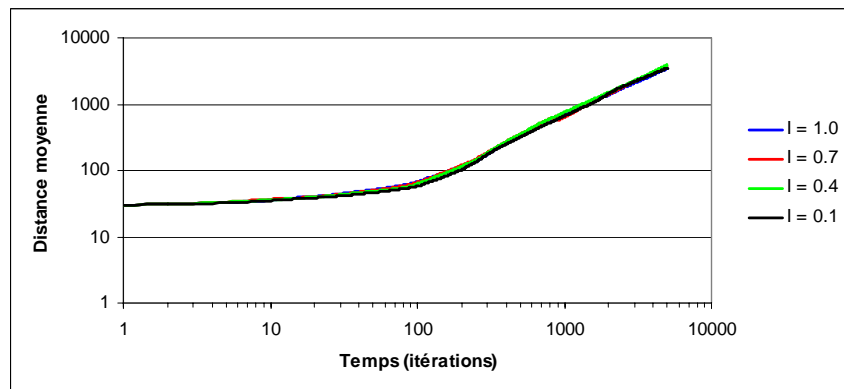
4.1.1.1 *Scénario 1 : une foule de piétons dans un environnement ouvert sans évitement de collision*

Les figures 5.14 (a) et (b) montrent les résultats graphiques des simulations d'une foule de piétons dans un environnement ouvert c'est-à-dire un environnement sans frontières (les murs). Dans ce scénario, nous avons exécuté seulement le comportement de maintien de groupe en éliminant les deux comportements d'évitement d'obstacles et de collision pour montrer l'effet exclusif des relations intra-groupe.

La variation de la distance moyenne entre le chef du premier groupe et les membres de ce même groupe en fonction de temps est présenté sur la figure 5.14 (a). Pour bien visualiser les variations obtenus au démarrage des simulations nous avons présenté dans la figure 5.14 (b) des graphes logarithmiques pour le même intervalle de temps [0, 5000].



(a) Graphes linéaire.



(b) Graphes logarithmiques.

Figure 5.14 : Graphes relatifs à la distance moyenne entre le chef du premier groupe et les membres de même groupe exécuté suivant le scénario 1.

On remarque sur les figures 5.14 (b), pour les quatre matrices intra-groupe de valeur 1.0 ; 0.7 ; 0.4 ; 0.1 ; une augmentation lente de la distance moyenne lors des premières itérations de simulation suivi d'une augmentation plus rapide au fur et à mesure lorsque le temps augmente.

L'augmentation de la distance moyenne est expliquée d'une part que les membres de groupe s'éloignent de leur chef puisque ce dernier n'est pas détecté dans leurs zones de perception. D'autre part, puisque l'environnement est ouvert la probabilité que les membres se rassemblent avec le chef diminue. Par ailleurs, l'augmentation lente de la distance moyenne au début de la simulation est attribuée à la vitesse faible de piéton au démarrage.

Exemple d'exécution

Les figures 5.15 montrent un exemple d'exécution du premier scénario en deux itérations différentes, la première au début de la simulation (itération 3) et la deuxième après un certain temps (itération 249).

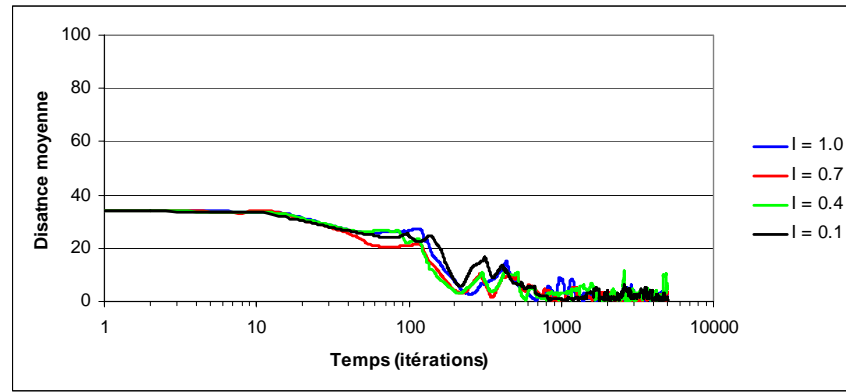


Figure 5.15 : Exemple d'exécution du premier scénario.

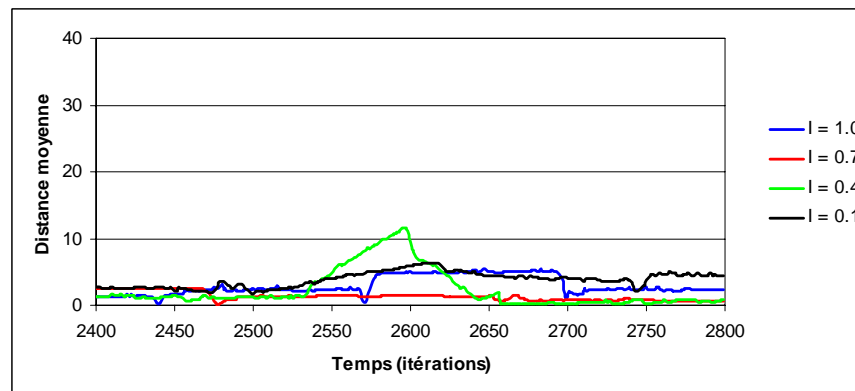
4.1.1.2 Scénario 2 : une foule de piétons dans un environnement fermé sans évitement de collision

Les figures 5.16 (a) et (b) montrent les résultats graphiques des simulations d'une foule de piétons dans un environnement fermé c'est-à-dire un environnement avec des frontières. Nous avons exécuté dans ce scénario deux comportements : le comportement d'évitement d'obstacles (les frontières), et le comportement de maintien de groupe.

La variation de la distance moyenne entre le chef de premier groupe et les membres de ce groupe en fonction de temps, pour les quatre matrices intra-groupe de valeur (1.0 ; 0.7 ; 0.4 ; 0.1), est représentée sur la figure 5.16 (a). Nous sommes intéressés à étudier une partie des graphes précédents dans l'intervalle de temps [2400, 2800] puisque elle présente un cas spécial (figure 5.16 (b)).



(a) Graphes semi-logarithmiques.



(b) Graphes linéaires.

Figure 5.16 : Graphes relatifs à la distance moyenne entre le chef du premier groupe et les membres de même groupe exécuté suivant le scénario 2.

On constate que les quatre courbes de la figure 5.16 (a) ont presque la même allure. La distance moyenne entre le chef de premier groupe et les membres de ce groupe diminue lorsque le temps augmente, jusqu'à elle atteint une valeur minimale et reste ensuite quasi constante jusqu'à la fin de simulation. Ceci est expliqué comme suit : au début de la simulation les positions des piétons sont aléatoires, donc les membres de premier groupe sont loin de leur chef. Après un certain temps, les membres détectent des piétons dans leurs zones de perception. La probabilité que les membres rencontrent leur chef augmente puisque l'environnement est fermé. Par conséquent, les membres se rapprochent de leur chef et le groupe devient plus serré ce qui conduit à la diminution de la distance moyenne entre le chef et les membres. Cette dernière reste quasi constante jusqu'à la fin de temps de simulation puisque une fois le groupe devient serré la probabilité que les membres s'éloignent de leur chef sera très petite.

Exemple d'exécution

Nous avons montré dans la figure 5.17 un exemple d'exécution du scénario 2 où la valeur de la matrice intra-groupe égale à 0.4. Cet exemple présente un cas particulier où un membre s'éloigne de son chef après qu'il a été inclut dans son groupe. L'exemple est présenté sur les figures ci-dessous en trois itérations différentes. A l'itération 1583 tous les membres du premier groupe (avec la couleur rouge) sont proches de leur chef. Par ailleurs, à l'itération 2593 un membre du premier groupe se déplace d'une manière aléatoire et s'éloigne de son chef. Après ce comportement aléatoire ce membre va certainement rencontrer son chef une autre fois puisque l'environnement est fermé, il exécute par la suite le comportement de maintien de groupe (itération 3135). Les résultats de cet exemple sont bien confirmés par le graphe de couleur vert ($I = 0.4$) de la figure 5.16 (b).

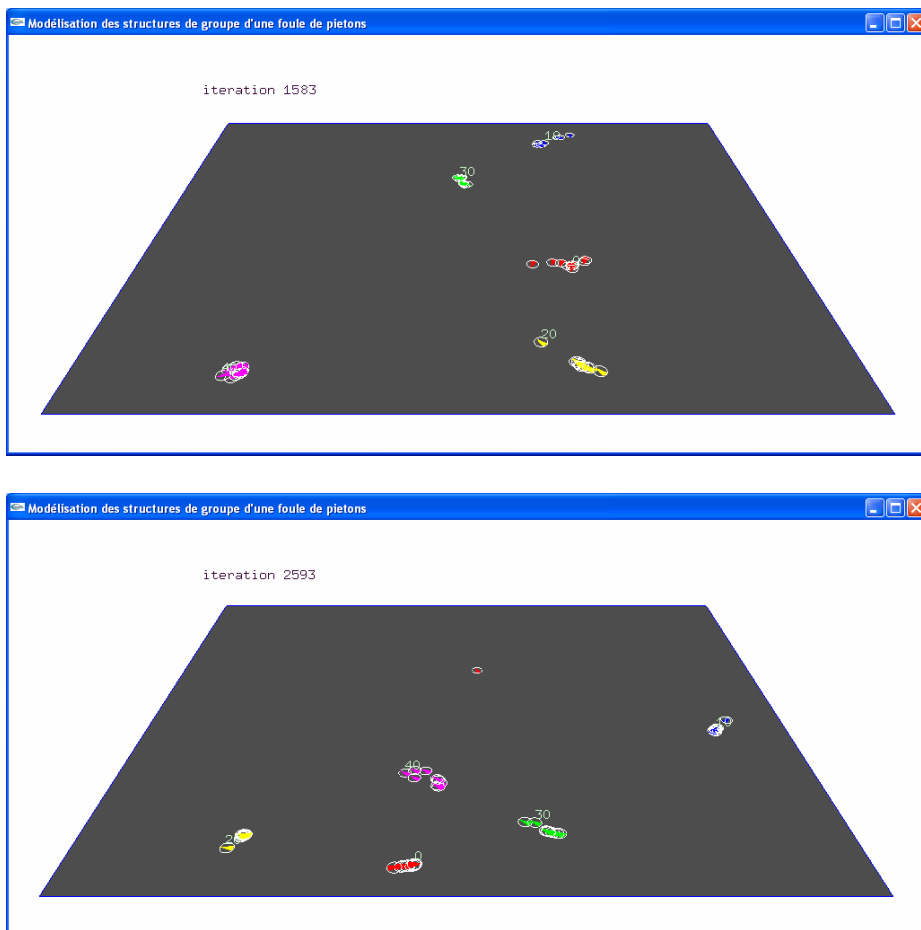




Figure 5.17 : Exemple d'exécution de scénario 2 avec une matrice intra-groupe de valeur 0.4

4.1.1.3 Validation

Pour valider notre travail, nous avons choisi de confronter nos résultats avec ceux obtenus par Qiu (2010). La figure 5.18 présente les résultats de Qiu (2010) où il a proposé une quantification de l'impact des relations intra-groupe par la distance moyenne entre les membres du premier groupe et le centre de ce même groupe. Cette distance est calculée pour les quatre matrices intra-groupes pendant le même intervalle de simulation. $I = C$ signifie que tous les éléments de la matrice intra-groupe, I , ont la valeur C (0 ; 0,1 ; 0,4 ; 0,7 et 1,0). Comme on peut voir, le changement de la valeur de C (matrice intra-groupe) influe d'une manière significative sur le mouvement de la foule.

Pour la validation, nous avons appliqué les mêmes conditions de simulation des résultats de la figure 5.18, à savoir : le même nombre de groupes, même nombre d'individus dans chaque groupe, le même principe de choix de comportement et aussi la même gamme d'itérations. Les résultats obtenus par notre simulation sont présentés dans les graphes de la figure 5.19. En comparant les deux figures 5.18 et 5.19, nous remarquons une similarité claire entre nos résultats et les résultats de Qiu. Ceci est un premier pas positif quant à la validation de notre système vue l'importance de l'impact des relations intra-groupe sur le mouvement de la foule. En effet, nous remarquons sur les deux figures que l'augmentation de la valeur C implique une diminution de la distance moyenne entre les membres du premier groupe et le centre de ce même groupe. Nous expliquons cela par le fait que si la valeur de la matrice intra-groupe est grande, le groupe sera plus serré. C'est-à-dire les individus de ce groupe seront très proches et donc la distance moyenne, entre les membres du groupe et le centre de ce même groupe, devient petite.

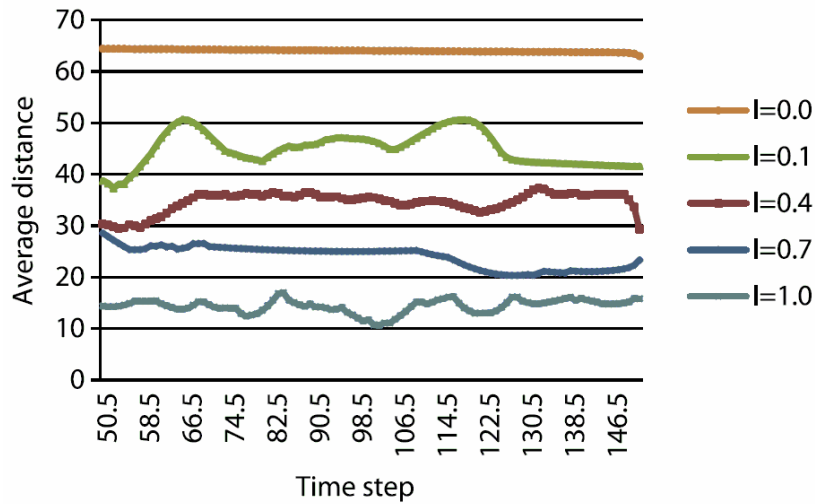


Figure 5.18 : Graphes relatifs à la distance moyenne entre les membres du premier groupe et le centre de ce même groupe (Qiu, 2010).

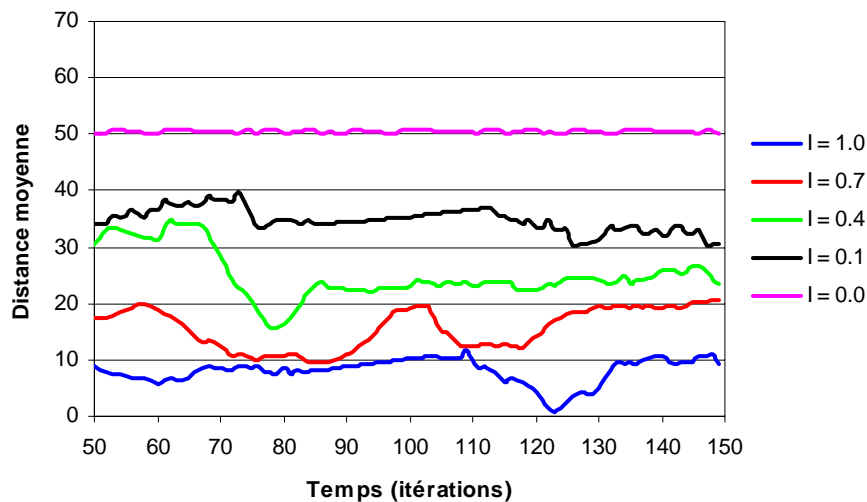


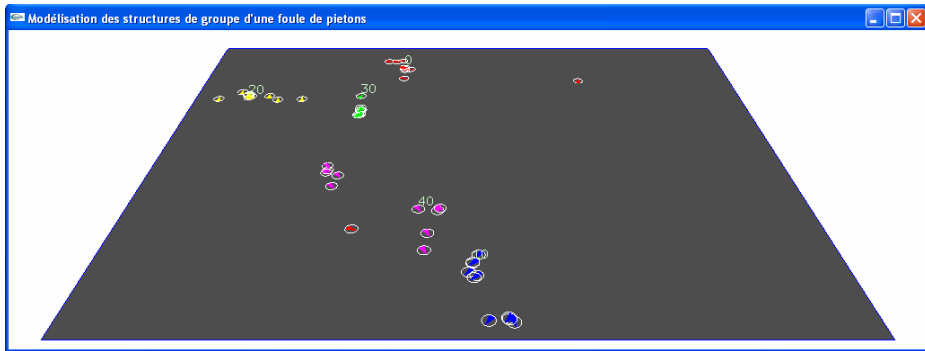
Figure 5.19 : Graphes du système implémenté, relatifs à la distance moyenne entre les membres du premier groupe et le centre de ce même groupe.

Pour une meilleure comparaison entre la simulation de la foule sans et avec structures de groupes, on a également montré dans les figures 5.18 et 5.19 un graphe où $I=0$. Dans ce dernier cas, la distance moyenne calculée est égale à la moyenne mathématique de la distance entre les 5 premiers membres et le centre de ces membres. Comme on peut voir dans les figures, la foule sans groupes sociaux possède la distance moyenne la plus grande par rapport à la foule avec groupes sociaux, puisque sans la structure de groupes chaque individu se déplace d'une manière aléatoire, il devient loin des autres et donc la distance moyenne entre les 5 premiers membres et le centre de ces membres sera grande.

4.1.2 Impact des relations inter-groupes

Dans les figures 5.20, des simulations montrant l'effet de la matrice inter-groupes (E) sur le comportement de la foule, respectivement pour $E=0,1$; $0,4$; $0,7$ et 1 . Pour montrer les

résultats obtenus, nous avons présenté les scénarios des simulations des figures 5.20 sous forme d'un graphe (figure 5.21).



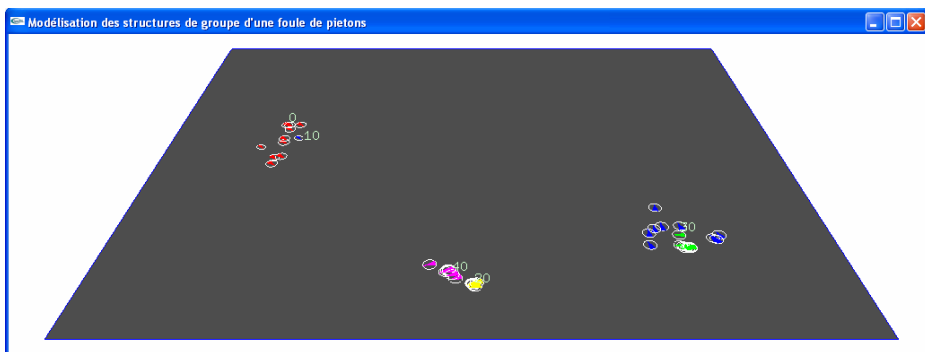
(a) $E = 0.1$, nombre de clusters = 9.



(b) $E = 0.4$, nombre de clusters = 7.



(c) $E = 0.7$, nombre de clusters = 5.



(e) $E = 1.0$, nombre de clusters = 3.

Figure 5.20 : Effet de la matrice inter-groupes (E) sur le comportement de la foule.

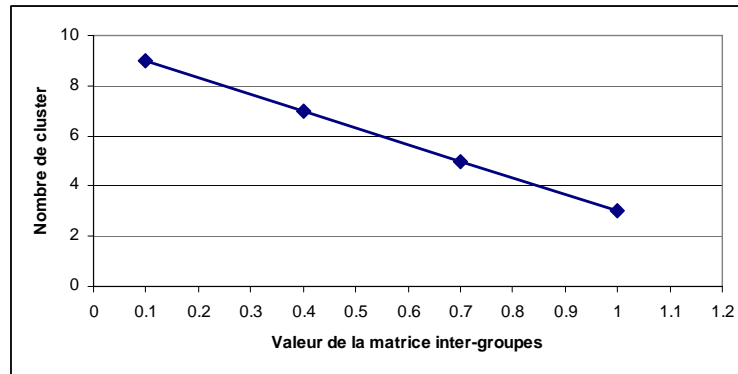


Figure 5.21 : Nombre de cluster pour différentes matrices inter-groupes.

Nous remarquons que plus qu'on augmente la valeur de la matrice inter-groupes (E), plus on aura moins de clusters. Ceci est expliqué par le fait que les chefs des groupes s'attachent davantage et suivent les individus des autres groupes avec l'augmentation de E . D'où l'obtention de grands groupes et donc moins de clusters comme le montre les figures 5.20.

Pour valider notre résultat, nous présentons dans les figures suivantes (5.22) les résultats de Qiu (2010) qui montrent l'effet de la matrice inter-groupes sur le mouvement de la foule. Nous remarquons que les résultats obtenus par notre simulation et ceux de Qiu sont très similaires.

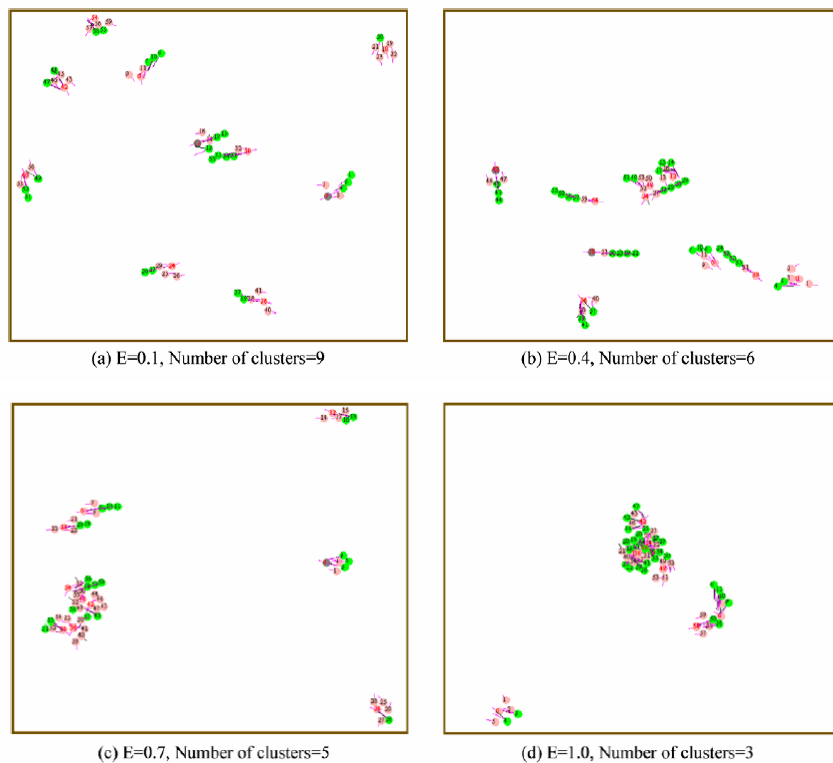


Figure 5.22 : Effet des relations inter-groupes sur le comportement de la foule (Qiu, 2010).

5 Conclusion

Le travail présenté dans ce mémoire définit un cadre uniforme pour la modélisation des structures de groupes d'une foule de piétons. Nous avons considéré deux aspects importants : les structures intra-groupe et les relations inter-groupes, et cela en utilisant différents paramètres. Le cadre présente un système de simulation de comportement de foule à base d'agent, il est implémenté dans la plate-forme Opensteer de Reynolds.

Les résultats obtenus montrent que le système implémenté permet de modéliser facilement différentes structures de groupes. Ainsi, les résultats ont montré que différents paramètres peuvent influencer sur le mouvement de la foule, à savoir : les structures intra-groupe, les relations inter-groupes.

Nous avons comparé les résultats obtenus avec le travail de Qiu (2010). Les résultats de nos simulations sont très similaires à celui de Qiu (2010), ils sont très satisfaisants et nous encourage à se baser sur notre plate-forme pour des travaux futurs.

Conclusion générale

La simulation de foules d'humains virtuels a été étudiée depuis plusieurs années dans différents domaines d'applications tel que : la conception architectural (mise en situation d'un nouveau bâtiment pour des besoins d'illustration, estimation des niveaux de service), la planification urbaine (évaluation des impacts des modifications de l'environnement), la sécurité (simulation d'évacuation), la thérapie de troubles sociaux par la réalité virtuelle (pour l'agoraphobie par exemple)... etc (Qiu, 2010; Lacroix, 2009).

L'élément essentiel dans les simulations de foules de piétons est le modèle de comportement de la foule. Depuis de nombreuses années, les chercheurs ont développé de nombreux modèles de foules (Qiu, 2010; Musse et Thalmann, 2001; Helbing et Molnar, 1995; Reynolds, 1999). Dans le présent travail, nous avons tenté d'introduire cette thématique, de modélisation et de simulation des structures de groupe d'une foule de piétons, pour la première fois dans notre laboratoire.

Puisque il s'agit d'une nouvelle thématique, le travail a été entamé par une étude bibliographique détaillée sur les modèles de foules discutés auparavant dans la littérature. Nous avons présenté ce travail de synthèse, dans la première partie de ce manuscrit, suivant un ordre chronologique : depuis le premier modèle proposé par Reynolds (1987) jusqu'au plus récent développé par Qiu (2010). Cette partie, d'analyse bibliographique, a permis d'établir une conclusion importante à propos de la modélisation de la structure des différents groupes. En effet, parmi les travaux déjà cités, aucun modèle n'a considéré la structure des différents groupes, qui peut avoir un impact important sur le comportement de la foule, excepté les travaux de Qiu (2010) et Qiu et Hu (2010). Ceci est partiellement dû au fait que la modélisation de comportement de groupe est une tâche difficile en raison des nombreux facteurs qui doivent être considérés.

Pour aboutir à nos objectifs, nous avons choisi le récent modèle de Qiu (2010) comme modèle de référence. Nous avons considéré la foule comme étant un ensemble de groupe de piétons où les relations intra et/ou inter groupe sont définies préalablement par l'utilisateur pour chaque simulation. Par conséquent, nous avons étudié d'abord les détails de notre approche et par la suite procédé à l'implémentation de notre système en utilisant la plate forme OpenSteer (Reynolds, 2004) écrite en C++.

Les résultats de simulations, obtenus par notre système, ont démontré l'effet de différents paramètres, à savoir l'impact des structures intra-groupe et des relations inter-groupes sur le mouvement de la foule. Pour valider notre approche nous avons comparé nos résultats avec ceux de Qiu (2010) et avons obtenus des résultats très satisfaisantes.

Perspectives

Puisque la plate-forme OpenSteer est utilisée pour la première fois dans notre laboratoire LESIA, nous espérons que le code développé dans le cadre de ce travail servira de base pour les prochains travaux de simulations des comportements de foules, notamment les comportements de directions. Ainsi, ce travail pourrait être approfondi et complété, notamment dans les axes suivants :

- Le modèle actuel suppose un groupe statique, tel que spécifié par les matrices intra et inter groupe, qui est maintenue grâce à la simulation. Elle suppose également un chef de groupe présélectionné, comme le premier individu de groupe, qui n'est pas dynamique et ne peut être pas remplacé par un autre membre. une autre extension de notre travail est d'accepté le changement dynamique des groupes et des chefs.
- Le comportement *MaintainGroup* est l'un des trois comportements exécutés dans notre simulation, un agent maintient son groupe seulement si ce comportement est sélectionné. On peut trouver des situations où le comportement *MaintainGroup* n'est pas sélectionné donc l'agent ne maintient pas son groupe. Par exemple, dans une foule dense, un groupe peut être séparé par les membres des autres groupes. Dans une telle situation, l'évitement de collision aura une priorité plus élevée ce qui fait l'agent évite la collision avec les autres au lieu qu'il maintient son groupe. Une des extensions de notre travail est donc de laisser un agent maintenir son groupe pendant qu'il évite les obstacles et les autres agents.

- Intégrer les différentes règles sociales et psychologiques tel que : la culture, l'émotion, la personnalité...etc.
- Développer la simulation pour étudier l'effet des structures de groupes sur le comportement de la foule dans d'autres situations par exemple le cas de panic.
- Améliorer l'affichage pour obtenir un rendu plus réaliste des agents, ainsi que des comportements plus réalistes.

Références bibliographiques

- Becheiraz, P. and D. Thalmann, "A Behavioral Animation System for Autonomous Actors personified by Emotion". *Proceedings of the First Workshop on Embodied Conversational Characters (WECC '98)*, Lake Tahoe, California, pp. 12-15 (1998).
- Berrou, J.L., J. Beecham, P. Quaglia, M. Kagarlis and A. Gerodimos, "Calibration and validation of the Legion simulation model using empirical data", *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Springer, pp. 167-181 (2005).
- Blumberg, B., M. Downie, Y. Ivanov, M. Berlin, M.P. Johnson and B. Tomlinson, "Integrated Learning for Interactive Synthetic Characters". *Proceedings of the 29th Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH-02)*, San Antonio, Texas USA, pp. 417-426 (2002).
- Boulic, R., R. Mas and D. Thalmann, "Position Control of the Center of Mass for Articulated Figures in Multiple Support". *Proceedings of the Sixth Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation*, Wien, pp. 130-143 (1995).
- Bouvier, E., E. Cohen and L. Najman, "From crowd to airbag deployment: particle systems, a new paradigm of simulation", *Journal of Electronic Imaging*, **Vol.** 6(1), pp. 94-107 (1997).
- Bouzid, M., "Contribution à la modélisation de l'interaction agent/environnement : Modélisation stochastique et simulation parallèle". *Thèse de doctorat*, Université Henri Poincaré Nancy 1, pp. 133 (2001).
- Brogan, D.C. and J. Hodgins, "Group Behaviours for Systems with Significant Dynamics", *Autonomous Robots*, **Vol.** 4, pp. 137-153 (1997).
- Brogan, D.C., R.A. Metoyer and J. Hodgins, "Dynamically simulated characters in virtual environments", *IEEE C. G. A*, **Vol.** 18(5), pp. 58-69 (1998).
- Brooks, R.A., "A robust layered control system for a mobile robot", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, **Vol.** RA-2(1), pp. 14-23 (1986).
- Bruegge, B. and A.H. Dutoit, "Object-Oriented Software Engineering Using UML Patterns, and Java". *2nd edition*, Prentice Hall, pp. (2004).
- Cherif, F., "Animation comportementale : Simulation de foules d'humains virtuels". *Thèse de doctorat*, Université Mohamed Khider de Biskra, pp. 131 (2006).
- Conti, P.O., "Agents Intelligents : Emergence d'une nouvelle technologie pour la Gestion de Réseaux". *Thèse de doctorat*, Ecole nationale supérieure des télécommunications de Paris, pp. 189 (2000).
- Dijkstra, J., H.J.P. Timmermans and A.J. Jessurun, "A Multi-Agent Cellular Automata System for Visualizing Simulated Pedestrian Activity". *Proceedings of the Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata. Cellular Automata for research and Industry*, Berlin, pp. 29-36 (2000).

- Donikian, S., "Modélisation, contrôle et animation d'agents virtuels autonomes évoluant dans des environnements informés et structurés". *Habilitation à Diriger Des Recherches*, Université de Rennes 1, pp. 234 (2004).
- Ferber, J., "Les systèmes Multi-Agents : Vers une intelligence collective". InterEditions, Paris, pp. 522 (1995).
- Fridman, N. and G.A. Kaminka, "Towards a cognitive model of crowd behavior based on social comparison theory." *Proceedings of the AAAI'07, Twenty-Second National Conference on Artificial Intelligence*, Vancouver, British Columbia, pp. 731-737 (2007).
- Fugger Jr, T., B. Randles, J. Wobrock, A. Stein and W. Whiting, "Pedestrian behavior at signal controlled crosswalks", *SAE ICE*, (2001).
- Goffman, E., "Relations in Public: Microstudies of the Public Order", *Basic Books, New York, Etats-Unis*, (1971).
- Hanisch, A., J. Toujew, k. Richter and T. Schulze, ""Online simulation of pedestrian flow in public buildings". *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, pp. 1635-1641 (2003).
- Helbing, D., "Traffic and related self-driven many particle systems", *Reviews of Modern Physics*, **Vol. 73**, pp. 1067-1141 (2001).
- Helbing, D., I. Farkas and T. Vicsek, "Simulating Dynamical Features of Escape Panic", *Nature*, **Vol. 407**, pp. 487-490 (2000).
- Helbing, D. and P. Molnar, "Social force model for pedestrian dynamics", *Physical Review, Part E*, **Vol. 51**, pp. 4282-4286 (1995).
- Henderson, L.F., "The statistics of crowd fluids", *Nature*, **Vol. 229**, pp. 381-383 (1971).
- Hoogendoorn, S., "Pedestrian modelling by optimal control and differential games". *Proceedings of Finnish Seminar on Traffic Engineering*, German, Dutch, (2004).
- Hoogendoorn, S., "Pedestrian Travel Behavior Modeling", *Travel Behavior Research Lucerne, Elsevier*, pp. 10-15 (2003).
- Jennings, N., K. Sycara and M. Wooldridge, "A roadmap of agent research and development", *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, **Vol. 1**, pp. 275-306 (1998).
- Lacroix, B., "Normer pour mieux varier ? La différenciation comportementale par les normes, et son application au trafic dans les simulateurs de conduite". *Thèse de doctorat*, Université des sciences et technologies de Lille, pp. 163 (2009).
- Lattaud, C., "Approche Adaptative de Systèmes Multi-Agents dans un contexte Vie Artificielle". *Thèse de doctorat*, Université Paris V, pp. 204 (1998).
- Lauri, F., "Conception et implantation d'agents situés et incarnés capables de se déplacer en formation". *Mémoire*, INRIA Lorraine, Equipe MAIA, pp. 52 (2000).
- Lee, J.R.E. and R. Watson, "Regards et habitudes des passants", *Les Annales de la recherche urbaine*, **Vol. 57-58** (1992).
- Liu, Y. and L. Chen, "A Group Behavior Model of Real-time Crowds in Virtual Environments". *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, Chengdu, China, pp. 866-872 (2008).
- Lovas, G.C., "Modeling and Simulation of Pedestrian Traffic Flow", *Transportation Research Board*, **Vol. 28(6)**, pp. 429-443 (1994).
- Maes, P., "Modeling Adaptive Autonomous Agents", *Artificial Life Journal*, **Vol. 1(1&2)**, pp. 135-162 (1994).
- Mataric, M.J., "Learning to Behave Socially". *From Animals to Animats: International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pp. 453-462 (1994).

- Milazzo, J.S., N.M. Roupail, J.E. Hummer and D.P. Allen, "The Effect of Pedestrians on the Capacity of Signalized Intersections", *Transportation Research Record*, **Vol.** 1646, pp. 37-46 (1998).
- Musse, R.S., "Human crowd modelling with various levels of behaviour control". *Thèse de doctorat*, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brésil, pp. 164 (2000).
- Musse, R.S., F. Garat and D. Thalmann, "Guiding and Interacting with Virtual Crowds in Real Time". *Proceedings of Workshop Eurographics Computer Animation and Simulation*, Milan, Italy, (1999).
- Musse, R.S. and D. Thalmann, "A Model of Human Crowd Behavior: Group Inter-Relationship and Collision Detection Analysis". *Proceedings of Computer Animation and Simulations '97*, Budapest, Hungary, pp. 39-52 (1997).
- Musse, R.S., B. Ulicny and A. Aubel, "Groups and Crowd Simulation". In: N. Magnenat and D. Thalmann (Eds), *Handbook of Virtual Humans*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, pp. 323-352 (2004).
- Musse, S.R. and D. Thalmann, "Hierarchical Model for Real Time Simulation of Virtual Human Crowds", *IEEE Trans. on Visualization & Computer Graphics* 7, **Vol.** 2, pp. 152-164 (2001).
- Newell, A., "Unified theories of Cognition", Vol. Harvard University Press, Cambridge (Mass), pp. 549 (1990).
- Newell, A. and H.A. Simon, "Computer Science as Empirical Enquiry: Symbols and search". *Communications of ACM*, New York, USA, pp. 113-126 (1976).
- Noser, H. and D. Thalmann, "Sensor based synthetic actors in a tennis game simulation". *Proceedings of Computer Graphics International 1997 (CGI'97)*, Hasselt, Belgium, pp. 189-198 (1997).
- Okazaki, S., "Study of pedestrian movement in architectural space", *Part 1 : Pedestrian movement by the application on of magnetic models. Trans. of A.I.J.*, pp. 111-119 (1979).
- Ortony, A. and T.J. Turner, "What's basic about basic emotions?" *Psychological Review*, **Vol.** 97(3), pp. 315-331 (1990).
- O'Sullivan, C., J. Cassell, H. Vilhjalmsson, S. Dobbyn, C. Peters, W. Leeson, T. Giang and J. Dingliana, "Crowd and Group Simulation with Levels of Detail for Geometry, Motion and Behavior". *Proceedings of the Third Irish Workshop on Computer Graphics*, (2002).
- Pan, X., "Computational modeling of human and social behaviors for emergency egress analysis". *Thèse de doctorat*, Stanford university, pp. 127 (2006).
- Panzoli, D., "Simulation d'entités artificielles dans les environnements dynamiques virtuels". *Thèse de doctorat*, Université de Toulouse, pp. 144 (2008).
- Parent, R., "Computer Animation", *Algorithms and Techniques*. Morgan Kaufmann Publishers, (2002).
- Paris, S., "Caractérisation des niveaux de services et modélisation des circulations de personnes dans les lieux d'échanges". *Thèse de doctorat*, Université de Rennes 1, pp. 289 (2007).
- Patla, A.E., "Understanding the roles of vision in the control of human locomotion", *Gait & Posture*, **Vol.** 5, pp. 54-69 (1997).
- Pelechano, N., "Modeling realistic high density autonomous agent crowd movement: social forces, communication, roles and psychological influences". *Thèse de doctorat*, pp. 154 (2006).

- Pelechano, N., J. Allbeck and N. Badler, "Virtual Crowds: Methods, Simulation, and Control". *A.B. Barsky*, Vol. A Publication in the Morgan & Claypool Publishers series, Synthesis lectures on computer graphics and animation, pp. 176 (2008).
- Pelletier, P., "Simulation de comportements de foule". *Thèse de doctorat*, Université Laval Québec, pp. 250 (2003).
- Qiu, F., "A framework for group modeling in agent-based pedestrian crowd simulations". *Thèse de doctorat*, Georgia State University, pp. 144 (2010).
- Qiu, F. and X. Hu, "Modeling group structures in pedestrian crowd simulation", *Simulation Modelling Practice and Theory*, **Vol.** 18(2), pp. 190-205 (2010).
- Randles, B., T. Fugger Jr, J. Eubanks and P. E., "Investigation and analysis of real life pedestrian collisions", *SAE ICE Detroit Michigan*, (2001).
- Renault, O., N. Magnenat-Thalmann and D. Thalmann, "A vision based approach to behavioural animation", *Journal of Visualization and Computer Animation*, **Vol.** 1(1), pp. 18-21 (1990).
- Reynolds, C.W., "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model". *Proceedings of ACM SIGGRAPH '87 Conference*, Anaheim, California, pp. 25-34 (1987).
- Reynolds, C.W., "<http://opensteer.sourceforge.net/>", (2004).
- Reynolds, C.W., "Steering Behaviors For Autonomous Characters". *Proceedings of Game Developers Conference 1999*, San Francisco, California, pp. 763-782 (1999).
- Rodriguez, N., O. Heguy, J.-P. Jessel and H. Luga, "Assistance coopérative pour la téléopération". *Proceedings of International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG'2001)*, IRIT, pp. II9-II12 (2001).
- Russell, S. and P. Norvig, "Artificial Intelligence: A Modern Approach". Prentice Hall, Englewood Cliffs in New Jersey, pp. 723 (1995).
- Ruttkey, Z., C. Dormann and H. Noot, "Evaluating ECAs- What and How ?" *Proceedings of the first International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS'02), Conference Workshop : Embodied Conversational Agents_ Let's specify and evaluate them*, Bologna, Italy, (2002).
- Sanchez, S., "Mécanismes évolutionnistes pour la simulation comportementale d'acteurs virtuels". *Thèse de doctorat*, Université des Sciences Sociales Toulouse I, pp. 199 (2005).
- Santos, G. and B.E. Aguirre, "A Critical Review of Emergency Evacuation Simulation Models". in *NIST Workshop on Building Occupant Movement during Fire Emergencies*, Gaithersburg MD, pp. 27-52 (2004).
- Shao, W. and D. Terzopoulos, "Autonomous pedestrians", *Graphical Models*, **Vol.** 69(5&6), pp. 246-274 (2007).
- Shao, W. and D. Terzopoulos, "Autonomous Pedestrians". *Proceedings of ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation*, Ls Angeles, California ACM Press, New York, USA, pp. 19-28 (2005).
- Sharbini, H.B., "Crowd Modelling Behaviour Based on Modified Microscopic Models in Panic Situation". *Thèse de doctorat*, University of Teknologi Malaysia, pp. 87 (2010).
- Silcock, D., R. Walker and T. Selby, "Pedestrian at risk". *Proceedings of European transport conference*, PTRC, pp. 209-219 (1998).
- Steels, L., "The artificial life roots of artificial intelligence", *Artificial Life Journal*, **Vol.** 1(1), pp. 75-110 (1994).
- Still, G., "Crowd Dynamics". *Thèse de doctorat*, University of Warwick, UK, pp. (2000).

- Teknomo, K., "Microscopic pedestrian flow characteristics: development of an image processing data collection and simulation model". *Thèse de doctorat*, Université de Tohoku, Japon, pp. 131 (2002).
- Terzopoulos, D., X. Tu and Grzeszczuk, "Artificial Fishes with Autonomous Locolotion, Perception, Behavior and Learning, in a Physical World". *Proceedings of the Artificial Life IV Workshop*, MIT Press, Cambridge, Mass, (1994).
- Thalmann, D., R.S. Musse and M. Kallmann, "Virtual Human's Behavior: Individuals, Groups, and Crowds". *Proceedings of Digital Media Futures*, pp. 13-15 (1999).
- Thi Hai Ha, D., "Etude sur la définition et la modélisation de l'émotion". *Thèse de doctorat*, Université Bretagne - Sud, pp. 57 (2008).
- Thomas, G., "Environnements virtuels urbains : modélisation des informations nécessaires à la simulation de piétons". *Thèse de doctorat*, Université de Rennes 1, pp. 168 (1999).
- Thompson, P., H. Lindstrom, P. Ohlsson and S. Thompson, "Simulex : Analysis and Changes for IMO Compliance". *Proceedings of 2nd International Conference : Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp. 173-184 (2003).
- Thompson, P. and E. Marchant, "A Computer-model for the Evacuation of Large Building Population", *Fire Safety Journal*, **Vol.** 24(2), pp. 131-148 (1995).
- Tromp, J. and D. Snowdon, "Virtual Body Language: Providing appropriate user interfaces in collaborative virtual environments". *Proceedings of Symposium on Virtual Reality Software and Technology 1997 (VRST'97)*, Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), Lausanne, Switzerland, pp. 15 – 17 (1997).
- Wakim, F.C., "Etude de la prédiction de chocs véhicule-piéton". *Thèse de doctorat*, Université Paris XI ORSAY, pp. 161 (2005).
- Waller, D., J.M. Loomis, R.G. Golledge and A.C. Beall, "Place learning in humans : The role of distance and direction information", *Spatial Cognition and Computation*, **Vol.** 2(4), pp. 333-354 (2002).
- Wender, K.F., D. Haun, B. Rasch and M. Blümke, "Context effects in memory for routes", *Spatial Cognition III, Lecture Notes in Computer Science*, **Vol.** 2685 (2003).
- Wooldridge, M. and N. Jennings, "Intelligent Agents: Theory and Practice", *Knowledge Engineering Review*, **Vol.** 10(2), pp. 115-152 (1995).

Annexe : plate-forme ‘OpenSteer’

1	Introduction.....	123
2	Utilisation de OpenSteerDemo	123
3	PlugIns de OpenSteerDemo	124
4	Bibliothèque des comportements.....	126

1 Introduction

Cette partie est un résumé traduit en français de la plateforme OpenSteer que nous avons utilisé dans notre simulation. Elle est extraite à partir du site Web <http://opensteer.sourceforge.net/> (développée par Craig Reynolds en novembre 2004 et révisé en Juin 2007) et compléter par le travail de Lacroix (2009).

OpenSteer est une bibliothèque ouverte sert à construire des comportements directionnels pour les objets autonomes dans les jeux et les simulations multi-agents. Ces agents peuvent représenter des caractères (humains, animaux, créatures), des véhicules (voitures, avions, vaisseaux spatiaux) ou d'autres types d'agents mobiles. OpenSteer a été initialement développé sous Linux, ensuite il a été porté sur Windows et Mac OS X.

OpenSteer offre une application interactive appelée OpenSteerDemo qui démontre différents comportements de direction. OpenSteerDemo peut également aider les utilisateurs à créer des nouveaux comportements de direction, elle est basée sur une architecture plug-in, où l'utilisateur peut créer ces propres plug-in à partir des exemples existants.

OpenSteerDemo est écrit en C++ et utilise la bibliothèque graphique OpenGL. L'utilisateur peut télécharger une copie de l'exécutable OpenSteerDemo, et le code source des deux versions OpenSteer_0_7_2 et OpenSteer_0_8_2. La compilation de OpenSteer nécessite les éléments suivants :

- Le code source.
- Les deux bibliothèques graphiques OpenGL et Glut.
- Un environnement de développement (Xcode, Visual Studio et KDevle) pour (Linux, Windows et Mac OS X) respectivement.

2 Utilisation de OpenSteerDemo

L'exécution de l'application OpenSteerDemo est représentée sur la figure suivante :

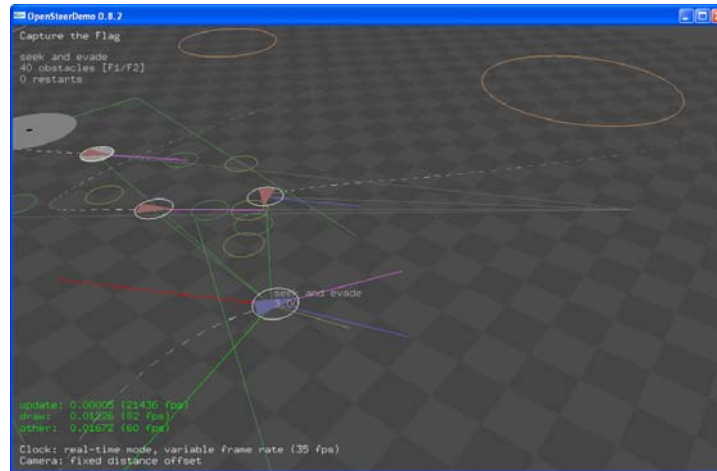


Figure 1 : Fenêtre de l'exécution de OpenSteerDemo.

L'application OpenSteerDemo contient un menu graphique sur l'interface de l'utilisateur. La souris permet de réaliser deux interactions différentes sur cette interface (ajustement de la vue de la caméra, sélection de véhicule). En plus, il est possible d'utiliser sur cette interface plusieurs commandes via les touches de clavier (voir tableau 1).

La touche	La commande
r	Redémarrer le Plugin
c	Sélectionner le prochain mode de la caméra
a	Activer ou désactiver la numérotation des caractères
Espace	Basculer entre Exécuter et Pause
→	Animation de caractère pas par pas
?	Afficher le menu Help sur la console
Esc	Fermer OpensteerDemo

Tableau 1 : guide de référence de OpenSteerDemo.

On doit noter qu'il existe d'autres commandes qu'on n'a pas cité et qui ont été désactivé puisque ils ne sont pas importants dans notre simulation.

3 PlugIns de OpenSteerDemo

Il existe dans l'application OpenSteerDemo une liste de PlugIn* qui servent à démonter les différents comportements de direction (comportement d'arriver, comportement de poursuite,

* Le Plug-In (ou Plugin) est un petit logiciel qui complète un logiciel hôte pour lui apporter de nouvelles fonctionnalités.

comportement d'évitement d'obstacle...etc). La liste se trouve dans (OpenSteerDemo/Plugins), elle contient les PlugIn suivant :

- Capture the Flag
- MapeDrive
- Pedestrians
- Boids
- Soccer
- Multiple Pursuit
- Low Speed Turn
- One Turning Away

One Turning Away est le PlugIn le plus simple, il définit un seul véhicule avec un comportement ordinaire. LowSpeedTurn aussi caractérise un comportement ordinaire mais avec plusieurs véhicules. Boids définit de nombreux véhicules, MultiplePursuit définit deux types de véhicules. Les deux PlugIn Pedestrians et CaptureTheFlag sont les échantillons les plus compliqués.

Dans notre application nous avons utilisé le PlugIn « Pedestrians ». Ce PlugIn présente la simulation de 100 agents qui suivent un chemin défini (la ligne rouge), en évitant la collision entre eux et avec deux obstacles sphériques (figure 2).

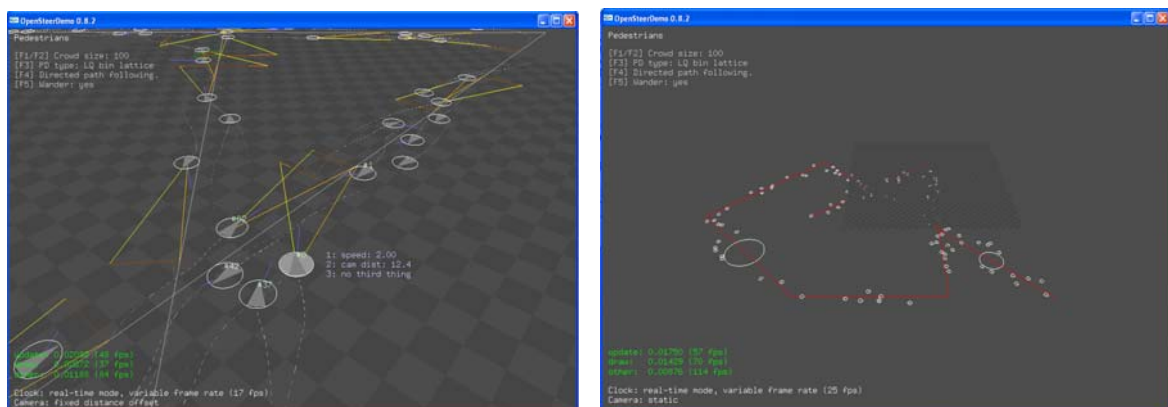


Figure 2 : Exécution de PlugIn « piétons » selon deux vues différentes.

4 Bibliothèque des comportements

Dans OpenSteer, la bibliothèque principale des comportements de direction est contenue dans la classe `SteerLibraryMixin` (définie dans `SteerLibrary.h`). `SteerLibraryMixin` ajoute des fonctionnalités directionnelles aux classes qui supportent l'interface `AbstractVehicle`. Par exemple, `SimpleVehicle` combine `SteerLibraryMixin` et plusieurs autres services avec `AbstractVehicle`. En conséquence, `SimpleVehicle` a tous les comportements définis dans `SteerLibraryMixin`, qui sont citées ci-dessous.

- le comportement d'errance.
- le comportement de recherche.
- le comportement de fuite.
- le comportement de suivre de chemin.
- le comportement d'évitement d'obstacle.
- le comportement de poursuite.
- le comportement d'évasion.
- le comportement d'évitement de collision non-alignée.
- le comportement de séparation.
- le comportement de cohésion.
- le comportement de l'alignement.

Les comportements proposés se situent à un niveau intermédiaire de la prise de décision de l'agent : ils ne concernent pas le choix stratégique de réalisation d'une action, ni la mise en oeuvre finale du déplacement proprement dit. Ces niveaux sont laissés à la convenance de l'utilisateur : l'approche proposée est ainsi générale, et ne dépend pas de la « personification » de l'agent. Elle fonctionne de manière identique pour un humain, une voiture, un vaisseau spatial, un sous-marin...etc. La résultante d'un comportement est un vecteur de direction, qui est ensuite combiné à la vitesse actuelle pour déterminer le prochain point cible. Parmi ces comportements élémentaires, on trouve par exemple :

1. La recherche, qui permet de diriger le personnage vers une position spécifique de l'espace (figure 3). Ce comportement ajuste la vitesse de l'agent afin qu'elle

soit dirigée radialement vers l'objectif : un vecteur « vitesse désirée », dirigé vers la cible, est construit ; la différence entre la vitesse actuelle et la vitesse désirée donne le vecteur direction résultat. A partir de ce comportement se déclinent ceux de fuite (la vitesse désirée est dirigée à l'opposé de la cible), de poursuite (le comportement de recherche est appliqué à un objectif mobile dont on estime la position future), et d'évasion (identique à poursuite, mais en appliquant la fuite au lieu de la recherche)

2. Le comportement d'évitement d'obstacles, qui permet à l'agent d'évoluer dans un environnement encombré. L'agent utilise un cylindre virtuel, dirigé vers l'avant : si un obstacle est détecté dans ce cylindre, cela déclenche une réaction. La direction correctrice est calculée en prenant l'opposé de la projection du centre de l'obstacle sur la perpendiculaire à la direction de l'agent (figure 3). Cette correction permet à l'agent d'éviter les obstacles de manière fluide.
3. Le suivi de chemin, qui permet à un agent de suivre un chemin prédéterminé, sans toutefois le contraindre de manière rigide sur une trajectoire. L'agent évolue ainsi au voisinage du chemin, comme un humain marche sur un trottoir sans forcément rester systématiquement exactement au milieu. Pour ce faire, il se base sur une estimation de sa position future : si elle est en dehors de la zone de variation autorisée, une correction est appliquée. Le comportement recherche est appliqué vers la projection de la position estimée sur le chemin (figure 3).

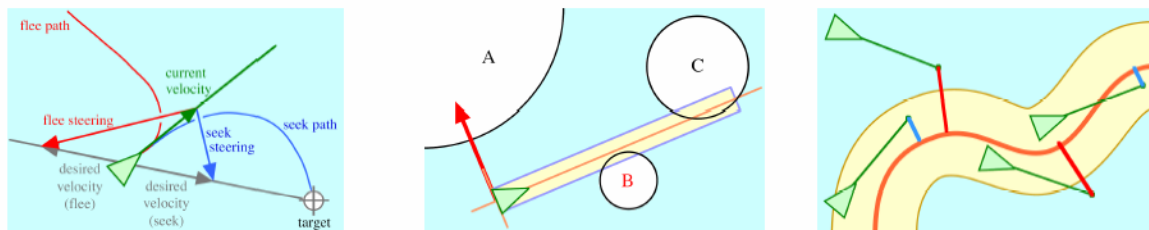


Figure 3 : De gauche à droite : le comportement de recherche, l'évitement d'obstacle et le suivi de chemin.

En plus de ces comportements individuels, des comportements de groupe peuvent être utilisés. Ils reposent sur l'observation des agents dans le voisinage. Par exemple, la séparation exerce une force de répulsion pour chaque agent du voisinage, proportionnellement à la distance. Elle permet d'éviter que les agents ne se regroupent trop. La cohésion pousse les agents à se regrouper : elle exerce une force vers le centre

de gravité des agents présents dans le voisinage. Enfin, l'alignement applique à l'agent une correction correspondant à la moyenne des vecteurs vitesse de tous les autres agents. Notons qu'utilisés ensemble, ces trois comportements constituent le modèle boids (Reynolds, 1987).

Enfin, les comportements élémentaires peuvent être combinés afin de créer des comportements plus complexes. Les combinaisons peuvent consister en l'utilisation alternée de certains d'entre eux : si je cherche de la nourriture avec recherche, et qu'un prédateur apparaît, j'utilise l'évasion et abandonne complètement l'autre comportement. Toutefois, je peux avoir envie de combiner l'évitement d'obstacle avec mon évasion afin de ne pas rentrer dans un arbre. Ces combinaisons se font typiquement soit en réalisant une somme pondérée des vecteurs directions résultants de chacun des comportements, soit en privilégiant un comportement particulier, afin d'éviter que les effets ne s'annulent mutuellement. L'agrégation permet ainsi de reproduire des situations comme la poursuite d'un attaquant ou le déplacement simultané de nombreux agents dans un environnement complexe (figure 4).

Ces différentes méthodes sont appliquées dans le monde du jeu vidéo et de la vie artificielle, et présentent un intérêt certain pour introduire du réalisme dans les simulations. De plus, elles sont peu coûteuses en temps de calcul, car conçues pour être très efficaces. L'introduction de comportements naturellement variés, en limitant les contraintes afin que chaque agent agisse de manière légèrement différente, peut être obtenu par ce type de technique.

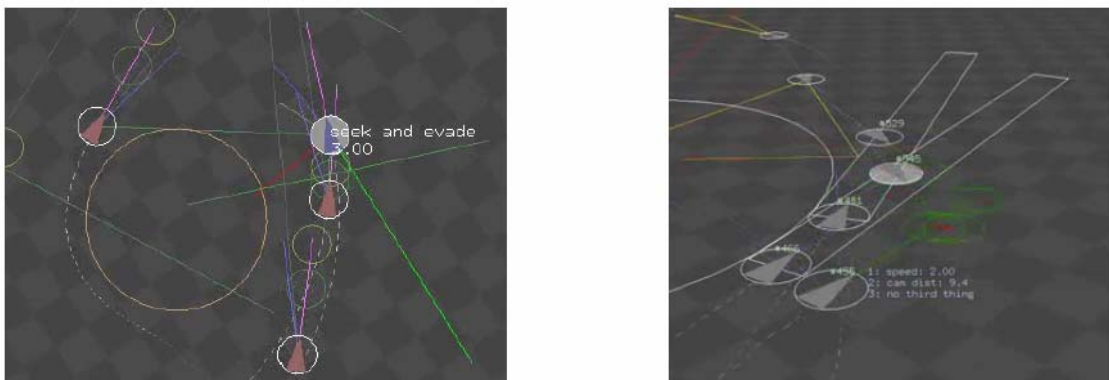


Figure 4 : À gauche, un exemple de poursuite, à droite, une foule suivant un chemin commun.

Résumé : Le groupement est un phénomène habituel dans la foule des piétons, il joue un rôle important dans le comportement de la foule. La modélisation de groupe est une tâche difficile à résoudre, en raison de nombreux facteurs, jusqu'à présent il n'a pas été largement étudié dans la littérature. Notre travail est motivé par le besoin de modéliser le comportement de groupe, il propose un cadre uniforme pour la modélisation de différentes structures de groupe d'une foule de piétons. On a considéré deux aspects : les connexions intra-groupe et les relations inter-groupes, leurs effets sur le comportement de la foule sont modélisés. Les résultats de simulations, obtenus par notre code, ont démontré l'effet de différents paramètres, à savoir l'impact : des structures intra-groupe et des relations inter-groupes sur les comportements de la foule.

Mots clés : foule, comportement, simulation comportementale, évitement de collision, navigation.

Abstract: Grouping is a common phenomenon in pedestrian crowds and plays important roles in affecting crowd behavior. Group modeling is a difficult task to solve because of many factors; so far it has not been widely studied in the literature. Our work is motivated by the need of group modeling for crowd behavior simulation; it provides a uniform framework for modeling different group structures of a pedestrian crowd. We have considered two aspects: intra-group structure and inter-groups relationships, their effects on crowd behavior are modeled. The simulations results obtained by our code have demonstrated the effect of different parameters, namely the impact of connections intra-group and inter-group relationships on crowd behavior.

Key words: crowd, behavior, behavioral simulation, collision Avoidance, navigation.

المخلص: التجمع هو ظاهرة شائعة في حشد المارة و تلعب دورا هاما في سلوك الحشد. نمذجة المجموعة مهمة من الصعب حلها بسبب العديد من العوامل التي تتحكم فيها، حتى الآن لم يتم دراستها على نطاق واسع. إن الدافع الرئيسي وراء عملنا هذا هو الحاجة إلى نمذجة سلوك المجموعة، حيث يقترح هذا البحث إطارا موحدًا لنمذجة مجموعات مختلفة من حشد من المارة. لقد تطرقنا إلى جانبين مختلفين : الاتصالات داخل المجموعة الواحدة والعلاقات بين المجموعات ، و نمذجة تأثيرها على سلوك الحشد . نتائج المحاكاة بينت أثر مختلف العوامل: الاتصالات داخل المجموعة والعلاقات بين المجموعات على سلوك الحشد.

الكلمات المفاتيح: الحشد، السلوك، المحاكاة السلوكية، تجنب الإصطدام، الإبحار.