



Université
de Toulouse

Méthode intuitive de simulation de piétons en milieu urbain

par Jérémy Boes

Maîtres de stage : Cédric Sanza, Stéphane Sanchez

[Tuteur : Loïc Barthe]



Mots Clés : animation comportementale, ville virtuelle, évitement de collision, simulation de foule

Remerciements

Tout d'abord je remercie Cédric Sanza et Stéphane Sanchez pour m'avoir aidé et soutenu tout au long du stage ainsi que pour leurs nombreuses démarches auprès des entreprises.

Je remercie également Jean-Pierre Jessel pour m'avoir dirigé vers eux, ainsi que Loïc Barthe et Mathias Paulin pour m'avoir incité à m'inscrire en Master 2 Images & Multimédia.

Enfin, un merci particulier à mes amis sans qui je n'aurais probablement pas tenu jusqu'au stage, ainsi qu'à Maroussia Vavasseur pour l'aide à la mise en page de ce rapport.

SOMMAIRE

I. Introduction.....	6
A. Contexte	6
B. Domaines.....	6
B-1. Animation comportementale	6
B-2. Simulation de foule.....	6
C. Objectifs	7
II. Recherche Bibliographique.....	8
A. Introduction.....	8
B. Considérations générales	9
B-1. Caractéristiques d'une foule.....	9
B-2. Environnement	10
B-3. Modes de contrôle	12
C. Approche Agents	13
C-1. Qu'est-ce qu'un agent ?.....	13
C-1.1 Agent réactif vs. Agent cognitif	14
C-1.2 Agent situé vs. Agent communicant.....	14
C-1.3 Autres caractéristiques.....	14
C-2. Quelques méthodes en détail	16
C-2.1 Un modèle de foule faible densité	16
C-2.2 Un modèle polyvalent : HiDAC	19
D. Autres Approches	22
D-1. Dynamique Continue.....	22
D-2. Dynamique Globale	24
D-3. Patches de Foule.....	26
D-4. Foules par l'exemple.....	28
E. Conclusion	29
III. Travail réalisé.....	30
A. Introduction.....	30
A-1. Etat initial du projet.....	30
A-2. Premières pistes	30
A-3. Choix de l'approche	31
B. Observations	32
C. Comportements réactifs	33
C-1. Éviter les obstacles	33
C-1.1 Directions libres et direction désirée	33
C-1.2 Anticipation	34

C-2.	Comportements réactifs secondaires.....	35
C-2.1	Rester dans les zones sûres	35
C-2.2	Ralentissements et arrêts.....	36
D.	Stratégies.....	37
E.	Se déplacer à plusieurs.....	39
E-1.	Fonctionnement	39
E-2.	Formation	41
E-3.	Remarques.....	41
F.	Conclusion	42
F-1.	Résultats	42
F-2.	Évaluation	44
F-2.1	Évitement de collisions	44
F-2.2	Maintien dans les zones appropriées	45
F-2.3	Déplacements en groupe	45
F-2.4	Stratégies.....	46
F-2.5	Comparaison réalité/simulation.....	48
F-3.	Avantages et inconvénients d'un moteur physique	48
F-4.	Principales difficultés.....	49
IV.	Bilan	50
A.	Contribution au projet.....	50
A-1.	La place de mon travail.....	50
A-2.	Perspectives.....	51
B.	Apports du stage	52
B-1.	Vécu	52
B-2.	Avenir.....	52
	Références bibliographiques	53
	Annexes.....	56

I. INTRODUCTION

A. CONTEXTE

Mon stage s'est déroulé du 15 mars au 15 septembre 2010 à l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT), au sein de l'équipe VORTEX (Visual Objects from Reality To Expression). Mes tuteurs étaient M. Cédric Sanza et M. Stéphane Sanchez. Ce rapport présente une méthode de navigation réactive pour des piétons virtuels en milieu urbain. Il se compose d'une rapide introduction des domaines concernés, suivie des objectifs initiaux et d'un état de l'art présentant les problématiques et les techniques les plus importantes. J'exposerai ensuite le travail réalisé et conclurai sur ce que j'ai apporté au projet et ce que m'a apporté le stage.

À l'époque où il a fallu choisir un master 2, j'ai longuement hésité entre Image et Intelligence Artificielle, ainsi qu'entre master professionnel et recherche. Suivant les conseils de M. Barthe et de M. Paulin, j'ai opté pour le master 2 professionnel Images & Multimédia avec un stage en laboratoire pour me laisser une chance de continuer en thèse. Souhaitant ne pas abandonner totalement l'Intelligence Artificielle, j'ai choisi pour mon stage une discipline faisant le pont entre image et IA : l'animation comportementale en environnement 3D.

B. DOMAINES

B-1. ANIMATION COMPORTEMENTALE

Ces dernières années, les images de synthèse ont connu une très forte expansion. Elles envahissent désormais aussi bien notre quotidien (effets spéciaux, films d'animations, jeux vidéo, etc) que les milieux professionnels (imagerie médicale, imagerie spatiale, architecture, conception assistée par ordinateur, etc). Elles sont de plus en plus belles et réalistes : il est parfois difficile de différencier une photographie d'une image de synthèse. Cependant, dans le cas de personnages virtuels animés, plus l'image est visuellement proche de la réalité, plus on s'attend à ce que le comportement des entités présente le même niveau de réalisme. Or ce n'est souvent pas le cas. L'illusion est alors brisée et l'immersion du spectateur s'en trouve amoindrie. Le cas des piétons autonomes animés est délicat puisque l'œil (ou plutôt le cerveau) humain est particulièrement efficace pour détecter les défauts dans le comportement d'autres humains. Il faut donc apporter un soin particulier à l'animation des personnages humanoïdes.

B-2. SIMULATION DE FOULE

Un cas particulier d'animation comportementale est la simulation de foule. Animer un grand nombre de personnages simultanément et de manière cohérente répond aux besoins d'un grand nombre de secteurs, citons par exemple le cinéma (pour éviter d'engager des milliers de figurants), le jeu vidéo (peupler les mondes virtuels) mais aussi l'urbanisme (simuler les flux de piétons pour mieux adapter le mobilier urbain ou les transports en commun), la sécurité (simuler l'évacuation d'un stade) ou encore le domaine militaire. Il y a deux problématiques principales dans la simulation de foule : l'aspect purement visuel d'un côté et l'aspect animation et comportement de l'autre. Mon stage concerne uniquement la partie comportementale.

C. OBJECTIFS

L'équipe dispose d'un modèle en 3D de la place de la République (Paris), ainsi que de modèles de piétons (maillage, texture et motion capture pour l'animation). Il est possible de donner une liste de cibles aux piétons qui se déplacent alors d'une à l'autre. Le module cinématique d'un moteur physique, Bullet Physics (<http://bulletphysics.org>), gère les collisions entre piétons et entre objets de l'environnement afin d'éviter qu'ils ne se passent au travers.

Cependant le déplacement des piétons n'est pas du tout naturel. Ils se dirigent aveuglément vers leur cible, en ne prenant en compte ni l'environnement, ni les autres piétons. Cela donne lieu à de nombreuses collisions, à des blocages ainsi qu'à des déplacements au milieu de la route. L'objectif global du stage est de régler ces problèmes et d'apporter plus de réalisme. Il est également demandé de prêter une attention particulière au cas du passage piéton (arrêt, traversée...). Deux points sont essentiels : la différenciation visuelle et comportementale des piétons, afin d'éviter l'effet « armée de clones » et la possibilité de se déplacer à plusieurs. En effet, on observe que les personnes marchant dans la rue sont fréquemment en petit groupe de deux à quatre personnes. Quant au nombre total de piétons simulés, l'objectif est simple : le plus grand possible.

C'est avec ces éléments en tête que je me suis lancé dans la recherche bibliographique préalable à tout travail. La synthèse de cette recherche se trouve dans la partie suivante.

II. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

A. INTRODUCTION

Il existe aujourd'hui plusieurs approches réalistes de la simulation de foule que je vais m'efforcer de décrire ci-après. La plus naturelle et la plus répandue est l'approche par agents (encore appelée *discrete crowds* en anglais) où l'on se concentre sur l'individu tout en espérant voir émerger un comportement global cohérent et réaliste [Pelechano07]. Puisque c'est celle que j'ai adoptée, c'est sur celle-ci que je m'attarderai le plus. Je présenterai ensuite d'autres méthodes comme les foules à dynamique continue (*continuum crowds*) où l'on a une vision globale des déplacements ou encore l'imitation de comportements à partir de vidéos. Les modèles basés sur les systèmes de particules [Heigeas03], où l'on associe chaque personnage à un point soumis à des forces d'attraction et/ou de répulsion commencent à être dépassés, je n'en parlerai donc pas.

Mais avant de présenter ces méthodes, je vais d'abord m'intéresser aux caractéristiques d'une foule ainsi qu'aux problématiques communes à toutes les simulations : l'environnement et le contrôle de la foule.

B. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

B-1. CARACTÉRISTIQUES D'UNE FOULE

En observant une foule au niveau microscopique, le comportement des individus semble chaotique et imprévisible. Pourtant il en résulte une auto-organisation qui mène à des comportements émergents structurés et prévisibles, comme la formation de lignes entremêlées lorsque deux flux de piétons se rencontrent face à face [Milgram69]. Ce phénomène peut s'expliquer par des interactions locales entre individus [Helbing01], mais le mécanisme complet reste mal connu [Moussaïd09].

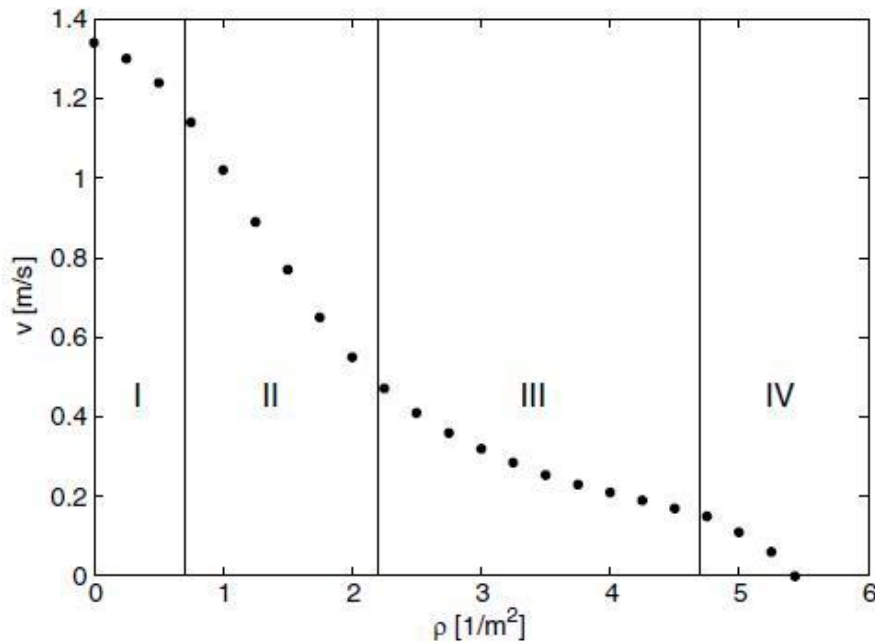


Fig. 1 – La relation empirique entre vitesse et densité selon Weidmann.

On observe également un lien fort entre la densité d'individus et leur vitesse moyenne. En effet la vitesse décroît à mesure que la densité augmente [Weidmann93]. La figure 1 montre le diagramme fondamental vitesse/densité des piétons sur un plan selon Weidmann. Il est intéressant de noter que la courbe présente quatre paliers de pente différente, suggérant que la réduction de la vitesse est due à plusieurs phénomènes différents et non un seul. Armin Seyfried et ses collègues proposent une explication [Seyfried05] :

Palier I : À faible densité, les piétons peuvent garder leur vitesse optimale en dépassant les plus lents. Les ralentissements sont causés par ces manœuvres de dépassement.

Palier II : Alors que la densité augmente, les piétons ne disposent plus d'assez d'espace pour dépasser. Ils ne peuvent plus aller à la vitesse désirée. Cependant il y a suffisamment d'espace pour éviter les contacts.

Palier III : Les contacts deviennent difficilement évitables mais la vitesse reste plus ou moins constante car ils ne jouent pas un rôle prépondérant.

Palier IV : À haute densité, les contacts sont inévitables. La vitesse décroît rapidement car l'espace libre est fortement réduit. Finalement les piétons n'ont plus du tout la place de bouger, la vitesse est nulle.

Le comportement du piéton est régi par un grand nombre de processus psychologiques qu'ils soient d'ordre perceptif (perception des vitesses, distances, formes, acuité visuelle, audition, etc.), psychomoteur (contrôle des mouvements, maîtrise de l'impulsivité), cognitif (capacité de concentration, d'anticipation, etc.), métacognitif (connaissance de ses propres limites perceptives), affectif (confiance en soi, etc.) ou social (relation à la règle, etc.) [Tom07]. Ces processus demeurent difficiles à modéliser et à simuler par l'informatique. Helbing les avait résumés en faisant une analogie avec les forces physiques dans son modèle des forces sociales qui a inspiré de nombreux chercheurs [Helbing95].

Afin de déterminer quels critères sont pertinents pour juger le réalisme d'une simulation, Ennis, Gerdelen et O'Sullivan ont effectué une série d'expériences où ils étudient les réactions de spectateurs face à diverses foules simulées [Ennis10]. Leurs résultats indiquent que pour avoir une simulation plausible, il faut :

- que les piétons tendent à rester dans les zones appropriées (par exemple sur les trottoirs et pas sur la route.
- que les individus tendent à marcher dans des directions naturelles, par exemple un dans un corridor doit être au maximum bidirectionnel (personne ou presque ne le parcourt dans la largeur).
- que les individus évitent les obstacles.
- que certains personnages marchent en petit groupe.
- que ces groupes soient présents dans des proportions plausibles (plus de personnes seules que de couples, plus de couples que de groupes de trois...)
- dans le cas des simulations incorporant de l'audio (dialogues, bruits de pas, etc.), il faut que le son soit synchronisé avec les gestes, attitudes et position des piétons.

Ces observations les ont aidés à améliorer leur modèle mais il reste encore beaucoup de questions en suspens, notamment autour des déplacements en groupe (formation, séparation temporaire pour éviter un obstacle, par exemple).

En dehors de ces considérations propres aux piétons, il existe un autre élément déterminant pour la simulation de foules : l'environnement.

B-2. ENVIRONNEMENT

Par environnement est désigné tout ce qui n'est pas un piéton : le lieu, le mobilier urbain, les murs, les routes, les portes... Particulièrement dans le cas des approches par agents, l'environnement n'est pas un simple « récipient » dans lequel on dépose une foule. Il sert d'interface entre les piétons, puisque c'est à travers lui qu'ils se perçoivent mutuellement. Un environnement virtuel peut-être statique [Lamarque04] ou dynamique (la topologie peut être modifiée pendant la simulation [Pelechano07, Yersin09]), ouvert [Treuille06] ou fermé [Pelechano07] mais dans tous les cas il doit permettre une interaction efficace avec un nombre conséquent de piétons. Car cette interaction joue un rôle majeur dans l'animation d'humains virtuels : ceux-ci doivent pouvoir percevoir les objets, planifier leur chemin, éviter les obstacles... tout en gardant un temps de calcul raisonnable. Voici deux exemples d'environnements dédiés à la simulation de foule.

Wei Shao et Demetri Terzopoulos proposent un ensemble de structures de données hiérarchiques permettant de construire des modèles d'environnements urbains grande échelle [Shao05a]. Il comprend une carte topologique, deux types de cartes pour la perception (un pour les objets mobiles, un autre pour les statiques), deux types de cartes pour la recherche de chemin (une

grille régulière, un quadtree) et un ensemble d'objets spéciaux comme les sièges, les files d'attente... (Fig. 2). La partie E-2.1 présente plus de détails sur cette représentation.

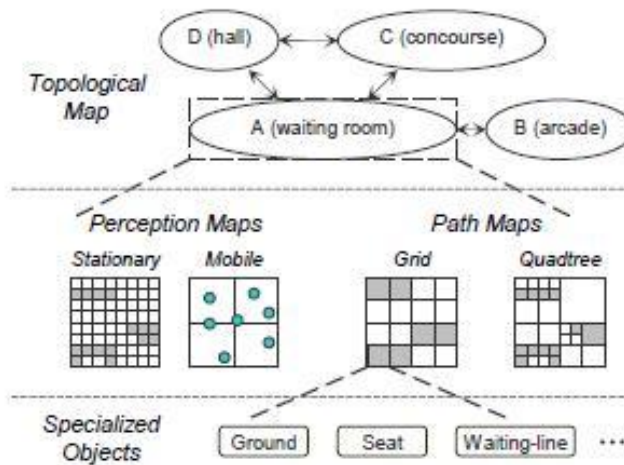


Fig. 2 – Modèle d'environnement de Shao et Terzopoulos

Sébastien Paris, Stéphane Donikian et Nicolas Bonvalet calculent un graphe d'environnement à partir de plans architecturaux [Paris06]. Chaque nœud du graphe est typé en fonction de sa connectivité topologique : 1 pour une voie sans issue, 2 pour un couloir, et 3 ou plus pour un carrefour. Enfin, un type de nœud représente les objets utilisables par les piétons (Fig. 3).

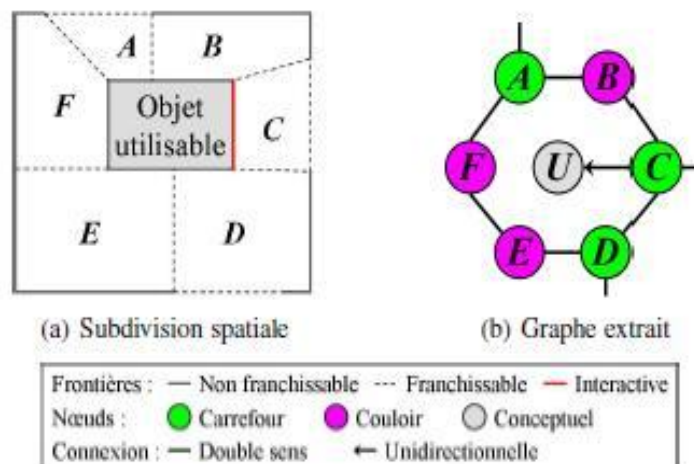


Fig. 3 – Graphe d'environnement de S. Paris et al.

Dans certaines approches non orientées agents, les structures de données de l'environnement régissent plus ou moins directement les déplacements des piétons (voir II-D-3).

B-3. MODES DE CONTRÔLE

Si les travaux tendent à donner de plus en plus d'autonomie aux foules virtuelles, certaines applications comme le jeu vidéo et les effets spéciaux demandent de pouvoir les contrôler facilement et précisément. Il existe plusieurs manières d'y parvenir.

Certains modèles permettent de contrôler la foule de plusieurs façons selon les besoins. Par exemple, Musse et Thalmann ont construit un modèle dont le comportement peut-être prédéfini grâce à des scripts ou guidé de manière interactive par un utilisateur externe (à l'aide d'un système d'envoi de commandes) [Musse01]. Un ensemble de règles (de la forme si... alors...), appelé « comportement inné » vient moduler ce contrôle. Concrètement si l'utilisateur envoie une commande demandant à un groupe de personnes de se rendre au restaurant, le comportement inné assurera l'évitement d'obstacles le long du chemin, tandis qu'un script décrira quel comportement adopter une fois la destination atteinte.

Cependant, scripts et guidage manuel laissent très peu d'autonomie à la foule. Les travaux plus récents sur les agents animés donnent la capacité aux humains virtuels de choisir eux-mêmes leurs actions en fonction de leurs besoins ou envies [DeSevin06,Shao05b].

C. APPROCHE AGENTS

La manière la plus intuitive et la plus naturelle d'aborder le problème de la simulation de foule est de se mettre dans la peau d'un piéton. Comme dans la réalité, chaque individu prend une décision indépendante des autres. L'objectif est de leur insuffler suffisamment « d'intelligence » pour voir émerger un comportement global réaliste.

C-1. QU'EST-CE QU'UN AGENT ?

Avant d'aller plus en avant, il convient d'apporter des précisions sur ce qu'est un agent. Une définition simplifiée, basée sur celles de Ferber [Ferber95] et de Wooldridge [Wooldridge02] pourrait être la suivante :

Un agent est une entité évoluant dans un environnement qu'elle est capable de percevoir et sur lequel elle peut agir en fonction de données internes ou externes.

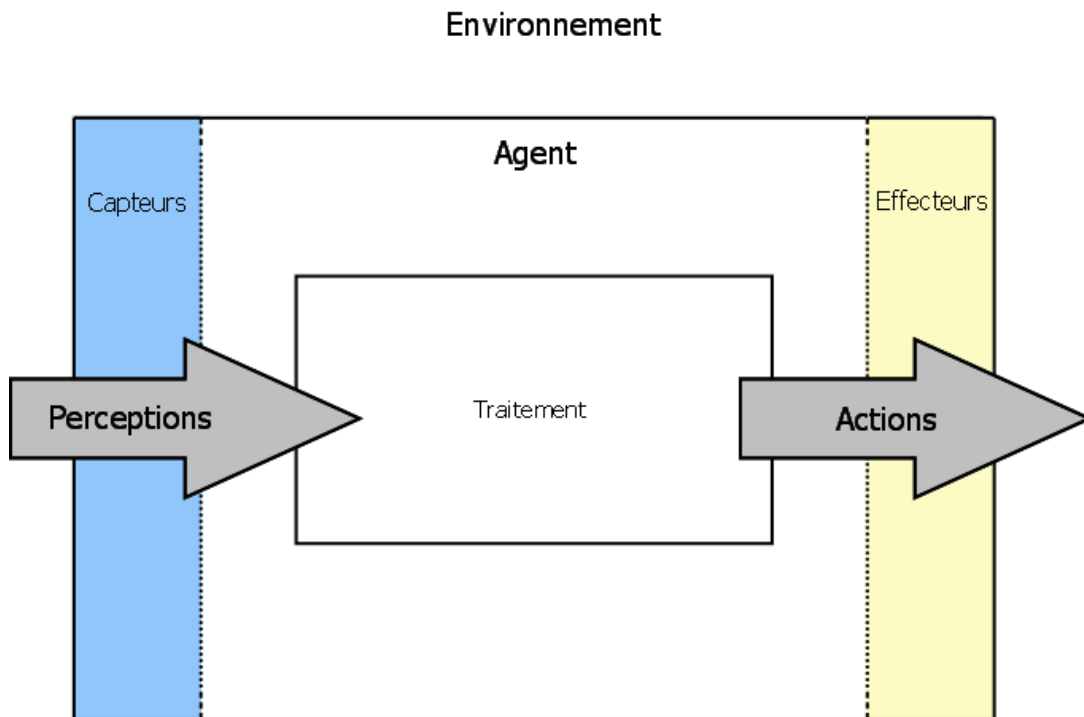


Fig. 4 – Schéma conceptuel d'un agent

L'utilisation d'un mot vague pour décrire ce qu'il se passe entre perceptions et actions est volontaire. En effet, selon le type d'agent, cela va de la simple réaction à la véritable décision qui peut être prise en fonction d'une représentation interne du monde extérieur, de savoir a priori, de connaissances apprises, d'états internes et bien sûr de perceptions. Bien souvent, il s'agit d'une combinaison de tout cela.

On distingue les agents principalement selon deux critères : leur architecture et leur mode de communication. Un agent peut ainsi être :

- réactif ou cognitif
- situé ou communicant

C-1.1 AGENT RÉACTIF VS. AGENT COGNITIF

Un agent ayant un comportement de type stimulus-réponse est dit agent réactif. Il n'a pas de représentation de son environnement, aucune mémoire de ses précédentes actions, ni de but explicite.

À l'inverse, un agent cognitif possède une représentation explicite de l'environnement, peut se rappeler de son passé et suit un but précis. Il peut planifier ses actions pour atteindre ce but.

C-1.2 AGENT SITUÉ VS. AGENT COMMUNICANT

Lorsque l'environnement possède une métrique et que les perceptions de l'agent dépendent de sa position au sein de cet environnement, on dit qu'il est situé. Les agents situés sont généralement capables de se déplacer. Ils ne communiquent pas directement entre eux mais via l'environnement. Un exemple concret serait une équipe de basketball virtuelle. L'environnement est le terrain, défini par ses caractéristiques géométriques, les agents sont les joueurs, communiquant par des gestes (appel de balle, annonce de tactique) perçus via l'environnement (on peut ne pas voir le geste). La tâche (mettre le ballon dans le panier) est résolue par leurs déplacements.

Les agents communicants quant à eux n'ont pas d'ancrage physique dans leur environnement, qui est lui aussi abstrait. Les informations sont échangées directement d'agent à agent. Par exemple, peut importe la place des neurones (agents) dans le cerveau (environnement), seules les connexions entre eux ont de l'importance. La tâche (prendre une décision) est résolue par la communication directe entre les différents agents.

C-1.3 AUTRES CARACTÉRISTIQUES

Dans le cas de la simulation de foule, tous les agents sont évidemment situés et tendent à être cognitifs. On dit aussi qu'ils sont mobiles car ils se déplacent dans leur environnement. Certains sont capables de s'adapter aux changements de leur environnement [Hu06], on parle alors d'agents adaptatifs. D'autres font preuve d'anticipation [Paris07], ce sont des agents prédictifs.

En s'inspirant de Funge [Funge99], Shao différencie plusieurs niveaux dans la modélisation et l'animation d'un agent-piéton [Shao06] : géométrique pour l'animation du squelette, cinématique pour les déplacements, perceptuel pour la faculté de percevoir son environnement et ses états internes, comportemental pour que l'agent réagisse correctement à ses perceptions, et enfin cognitif pour qu'il puisse acquérir du savoir et de l'autonomie (figure 5).

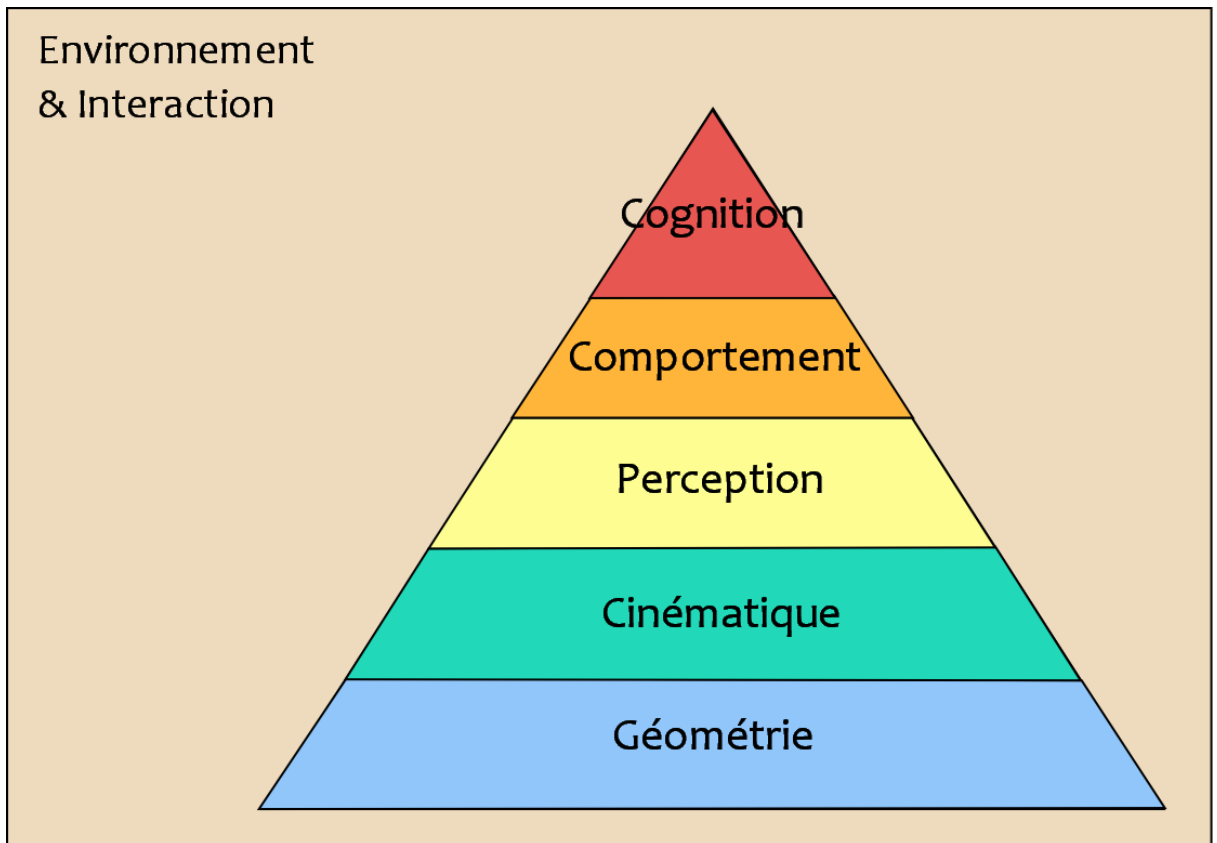


Fig. 5 – Pyramide de modélisation d'un humain virtuel

D'une manière plus générale, Reynolds divise un agent en trois couches : la sélection d'action (stratégie, planification de buts), le guidage (détermination du chemin) et la locomotion (animation, articulation) [Reynolds99]. La sélection d'action correspond au sommet de la pyramide, le guidage aux étages Comportement et Perception et la locomotion aux deux étages de la base.

C-2. QUELQUES MÉTHODES EN DÉTAIL

C-2.1 UN MODÈLE DE FOULE FAIBLE DENSITÉ

Les travaux sur les poissons artificiels de Demetri Terzopoulos [Terzopoulos94] ont inspiré de nombreux chercheurs pour la simulation de foules d'humains. Wei Shao et lui ont développé un modèle visant à rendre autonomes les humains artificiels [Shao05b]. Ils s'appuient sur une vision individualiste, où chaque piéton est doté d'une composante décisionnelle (cognitive) en plus de son comportement réactif habituel. Leur but n'était pas de simuler une foule à proprement parler, mais de peupler un environnement urbain d'individus autonomes présentant un comportement réaliste.

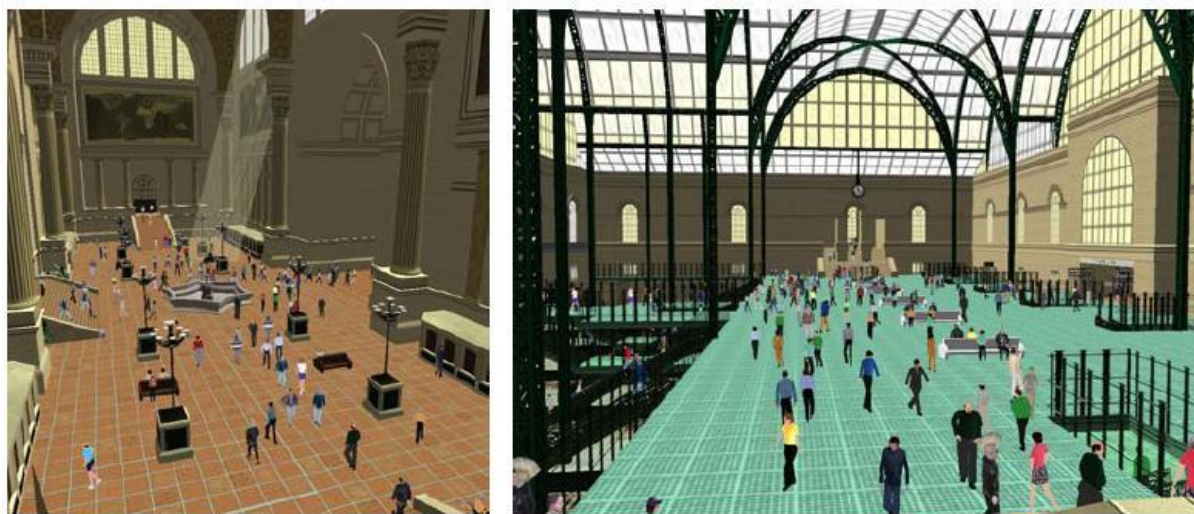


Fig. 6 – Vues de l'ancienne Pennsylvania Station recréée à partir de plans et de photos d'époque (à gauche la salle d'attente, à droite un des halls).

La première étape a été de construire l'environnement : l'ancienne Pennsylvania Station de New York a servi comme modèle. Un ensemble hiérarchique de cartes permet une perception optimale de l'environnement (voir II-B-2 et Fig. 2). Les nœuds de la carte topologique correspondent aux grandes pièces de la gare et les arêtes représentent les accès entre ces pièces. Chaque nœud contient deux cartes pour la perception (une pour les objets statiques, une autre pour les mobiles) et deux cartes pour la planification de chemin (une grille quadtree pour la planification de chemin longue distance et une grille régulière plus détaillée pour les courtes distances).

Les fonctionnalités bas niveau (l'apparence des piétons, leur animation corporelle et leur locomotion) sont assurées par DI-Guy, un logiciel payant. Les paragraphes suivants traitent de la perception, des comportements basiques et du contrôle cognitif.

Les piétons doivent percevoir trois informations importantes. La première, la hauteur du sol, est contenue dans la carte d'objets statiques. Une fois perçue, la hauteur du sol est envoyée aux couches bas niveau pour que le piéton pose le pied à la hauteur appropriée. Les objets statiques sont perçus en lançant un éventail de rayons dont la longueur et le nombre déterminent l'acuité visuelle de l'agent. Chaque cellule de la carte traversée par un rayon est interrogée, elle renvoie alors des informations sur les objets qu'elle contient. Pour percevoir les objets mobiles, le piéton examine en priorité les cases les plus proches de lui avant de passer aux suivantes. La perception se termine lorsque seize objets mobiles ont été repérés, ainsi le coût en temps de calcul est constant. Ce choix est justifié par le fait qu'à un instant donné les gens portent de l'attention sur un nombre limité d'autres personnes, généralement les plus proches.

Chaque piéton possède un ensemble de capacités motrices, comme rester immobile, avancer, tourner, accélérer et ralentir. Les comportements dits « réactifs » font le lien entre les perceptions et ces capacités. Six routines en gèrent le commencement, la terminaison et le séquençage à court terme en se basant à la fois sur les perceptions et sur l'état interne de l'agent :

Routine A : éviter les obstacles statiques

Routine B : éviter les obstacles statiques lors d'un virage

Routine C : maintenir une séparation avec les piétons voisins

Routine D : éviter les piétons

Routine E : éviter les piétons dangereusement près

Routine F : vérifier les nouvelles directions

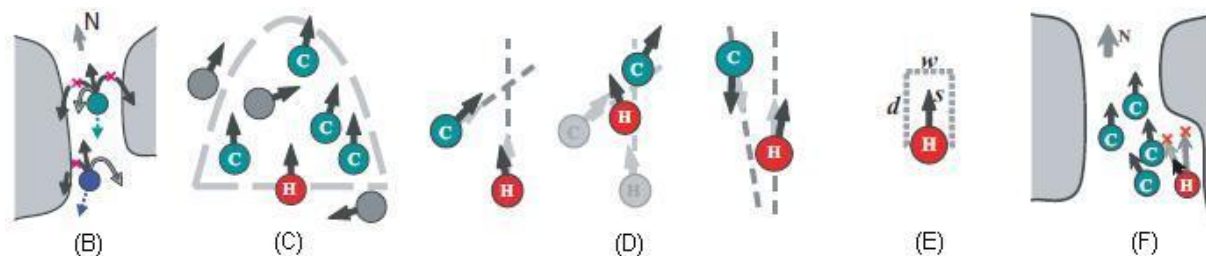


Fig. 7 – Comportements réactifs (routines)

La situation vécue par un piéton est toujours une combinaison des six situations clés couvertes par ces routines, le problème est alors de les séquencer correctement. La solution apparaissant comme la meilleure en termes de nombre de collisions est la suivante : C-A-B-F-E-D.

Ces comportements réactifs permettent aux piétons de déambuler en évitant (presque) toutes les collisions. À un niveau au-dessus, ils sont capables de naviguer dans la gare, c'est-à-dire de se rendre là où ils le désirent tout en choisissant un chemin optimal. Par exemple ils choisissent le portail ou la cage d'escalier à emprunter en fonction de sa proximité, mais aussi en fonction de la densité de personnes présentes autour. Si, en suivant un chemin, ils détectent un raccourci, ils modifient leur trajectoire pour l'emprunter. Et enfin, en arrivant à destination ils calculent un chemin plus précis pour atteindre la cible de manière plus réaliste.

D'autres comportements ont été implémentés pour permettre une occupation réaliste de la gare par les agents, comme s'asseoir sur un siège inoccupé, s'approcher et regarder un spectacle de rue, rencontrer un ami et bavarder avec, faire la queue à un distributeur ou à un guichet, etc.

Chaque piéton entretient une pile de buts, le sommet étant le but courant. Il possède également un ensemble de variables représentant ses besoins physiologiques, psychologiques et sociaux (état interne), tels que la fatigue, la soif, la curiosité, le besoin d'acheter un billet, etc. Lorsque la valeur d'un de ces besoins dépasse un certain seuil, un mécanisme de sélection d'action (Fig. 8) va choisir le comportement adéquat pour le satisfaire et faire diminuer la variable. Une tâche en cours d'exécution (par exemple « se rendre au guichet et acheter un ticket ») peut être interrompue si certaines conditions sont réunies (par exemple « avoir soif » et « présence d'un distributeur de boissons à proximité », dans ce cas le but « acheter une boisson » est placé au sommet de la pile). Les conditions ne proviennent pas forcément du module cognitif (ici la présence d'un distributeur).

Concrètement, la pile de buts représente ce qui doit être fait et l'état interne pourquoi cela doit-il être fait. Le module cognitif décide comment le faire à un haut-niveau (aller ici, acheter ceci) tandis que le module comportemental décide comment le faire concrètement (et le fait).

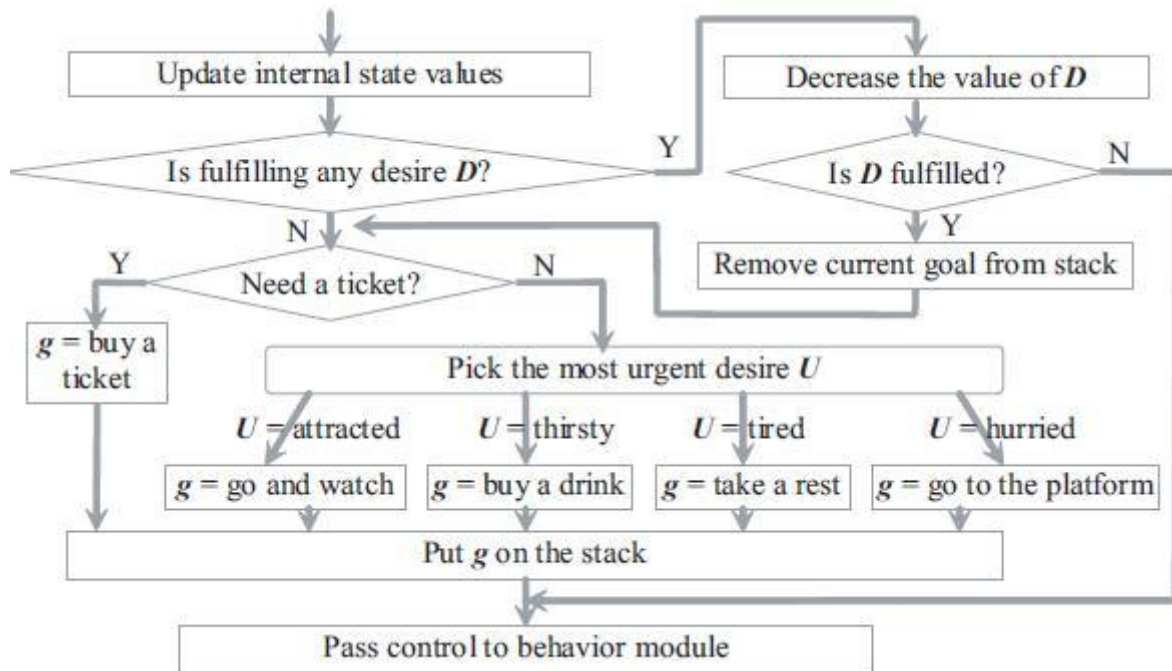


Fig.8 – Architecture de sélection d'action

Ce modèle est décrit dans [Shao05a], [Shao05b] et [Shao06]. La simulation seule peut tourner en temps réel (30 fps) avec 1200 piétons, mais pas si le rendu 3D est effectué en même temps. Il est complet, robuste et réaliste cependant il ne gère pas de « vraie » foule puisque celle-ci est plutôt éparse. Il manque également un point important, Shao et Terzopoulos se sont concentrés sur la notion d'individu et n'ont pas pris en compte les petits groupes de piétons. Si deux personnes (ou plus) se connaissent, elles devraient marcher ensemble et coordonner leurs choix sur une période donnée.

C-2.2 UN MODÈLE POLYVALENT : HiDAC

Avec HiDAC (pour High Density Autonomous Crowds), Nuria Pelechano et al. mêlent règles psychologiques et géométriques, ainsi que forces sociales et physiques [Pelechano07] en espérant ne garder que les bons côtés de chaque approche. Ils se concentrent sur les déplacements locaux et la recherche de chemin dans un environnement dynamique (sa topologie peut changer en cours d'exécution), mais fermé (toujours limité par des murs).

Chaque agent a son propre comportement selon ses variables personnelles représentant ses facteurs physiologiques et psychologiques. Celui-ci est calculé à deux niveaux. Le module haut niveau traite la navigation, l'apprentissage, la communication avec les autres agents et la prise de décision tandis que le module bas niveau s'occupe de la perception, de l'évitement d'obstacles et d'autres comportements réactifs. Le module haut niveau reçoit les changements de l'environnement perçus et prend une décision en fonction de cette information et de ses connaissances enregistrées. Lorsqu'il a décidé dans quelle pièce se rendre, il envoie un point d'attraction au module bas niveau pour que celui-ci gère le trajet. Une fois l'agent rendu à la cible, le module bas niveau demande au module supérieur le prochain point d'attraction.

Le module bas niveau est composé de trois sous-modules : perception, déplacement et locomotion. En fonction des informations qui lui sont envoyées par le sous-module de perception et de l'état interne de l'agent (panique, impatience, etc) le sous-module de déplacement calcule sa vitesse et sa position suivante. Celles-ci sont alors communiquées au sous-module de locomotion pour qu'il prenne en charge les mouvements à effectuer.

Les deux modules sont influencés par l'état psychologique et physiologique de l'agent. Par exemple les prises de décisions (module haut niveau) sont altérées par la panique, mais la vitesse l'est aussi (bas niveau). L'état interne est en retour modifié par ces deux modules, d'une part par les perceptions (bas niveau) et de l'autre par la communication (haut niveau). La figure 9 résume cette architecture.

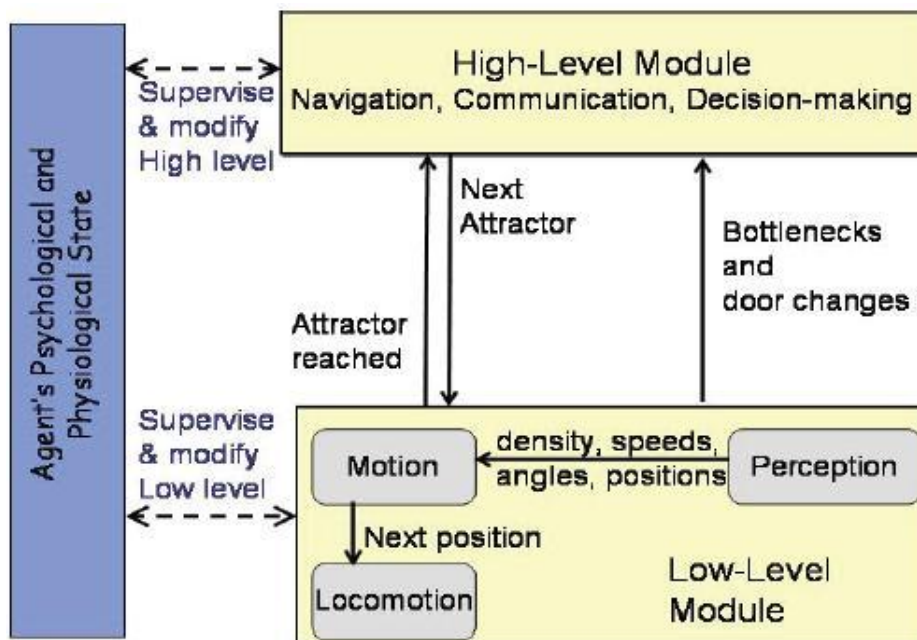


Fig. 9 – Vue d'ensemble de l'architecture de HiDAC

La force exercée sur un piéton à un instant donné résulte de considérations à la fois sociales (autres agents), géométriques (murs) et motivationnelles (cible). La force subie par un piéton i (F_i) est donc une combinaison du point d'attraction (F_i^{At}), de la répulsion des murs m (F_m^{Mu}), des obstacles k (F_k^{Ob}), des autres agents j (F_{ji}^{Ag}). Il faut également empêcher les changements de direction trop brutaux ($F_i[n-1]$). Toutes ces forces sont additionnées selon différents poids ω qui sont calculés en fonction de règles psychologiques et géométriques.

$$F_i[n] = F_i[n-1] + F_i^{At}[n]\omega_i^{At} + \sum_m F_m^{Mu}[n]\omega_i^{Mu} + \sum_k F_k^{Ob}[n]\omega_i^{Ob} + \sum_{j \neq i} F_{ji}^{Ag}[n]\omega_i^{Ag} \quad (1)$$

La nouvelle position est ensuite calculée à partir de cette force, de la vitesse maximale de l'agent, de la gestion de l'interpénétration, de la poussée par les autres agents, de l'évitement des personnes tombées au sol et bien sûr du temps entre deux pas de simulation.

$$p_i[n+1] = p_i[n] + \alpha_i[n]v_i[n]((1 - \beta_i[n])f_i[n] + \beta_i[n]F_i^{AgT}[n])T + r_i[n] \quad (2)$$

Où α représente si l'agent est poussé ou bien si il se déplace dans la direction désirée, v est sa vitesse, f est le vecteur force calculé en (1) normalisé, F_i^{AgT} est la force de répulsion des agents tombés au sol et β la priorité qui leur est accordée (car ils peuvent être enjambés), r_i est la correction de l'interpénétration et enfin T l'incrément de temps entre deux pas de simulation.

Dans un souci de concision je n'ai pas détaillé le calcul des différentes forces qui entre en jeu dans les équations (1) et (2). La figure 10 donne une idée des paramètres pris en compte : la distance, l'orientation (tangente) et le vecteur vitesse des obstacles (ici d'autres agents). Elle montre également le rectangle d'influence dans lequel les obstacles sont pris en compte.

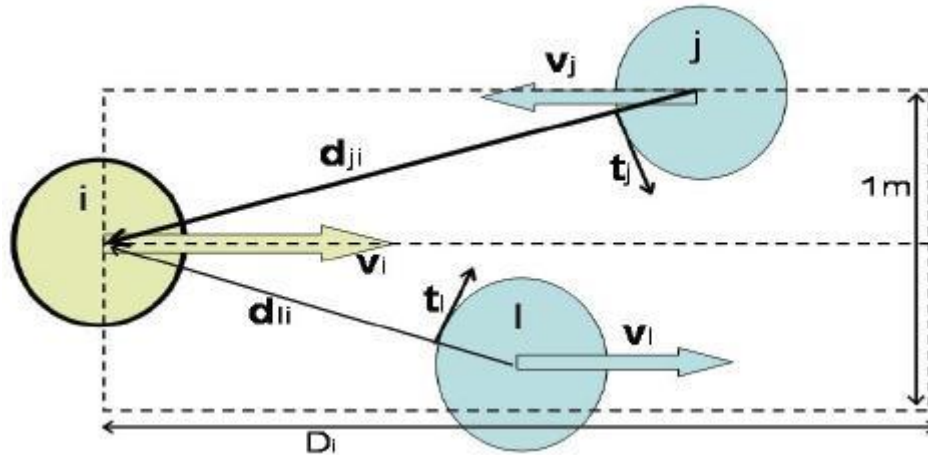


Fig. 10 – Rectangle d'influence et évitement de collision

Les agents disposent également d'une petite aire en forme d'ellipse (dont la taille varie selon leur personnalité) qu'ils tentent de garder vide. Elle sert notamment pour les comportements d'attente en file. HiDAC détecte les collisions, ce qui permet de réagir à celles-ci, les agents peuvent alors se pousser entre eux pour dégager un passage. Si un agent subi de trop fortes poussées, il peut tomber. Il devient alors un obstacle que les autres doivent éviter (Fig. 11.a). Dans certains cas ils peuvent être

amener à l'enjamber (en cas d'urgence, de manque d'espace, etc). En voyant les autres courir (ou en entendant une alarme, etc), les piétons peuvent entrer en mode panique. Leur tendance à paniquer dépend de critères liés à leur personnalité. Une fois dans ce mode, ils se déplacent plus rapidement, ont tendance à pousser et sont agités.

En cas d'embouteillage, le module bas niveau des agents impatientes demande au module haut niveau de trouver un chemin alternatif (Fig. 11.b). De la même manière, lorsqu'un changement dans l'environnement est perçu par le module bas niveau (comme une porte qui se ferme) il en informe haut niveau qui recalcule alors un nouveau point d'attraction : les agents s'adaptent en temps réel aux changements de leur environnement.

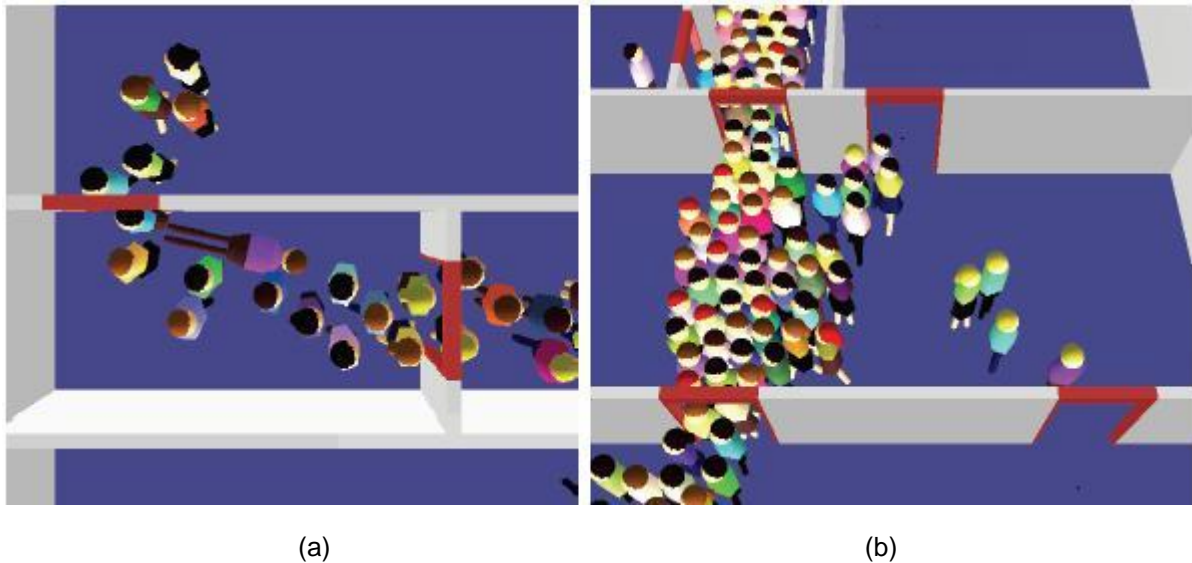


Fig. 11 – Des agents évitant un piéton au sol (a). Des piétons impatientes empruntant un chemin alternatif (b).

Ce modèle peut maintenir une simulation à 25 fps (rendu 3D compris) avec 600 agents. Il est possible de monter jusqu'à 1800 agents en n'effectuant pas le rendu. Paramétrer correctement HiDAC, particulièrement pour définir la personnalité de chacun des piétons, nécessite de bien connaître son fonctionnement. Afin de faciliter cette tâche, le modèle psychologique OCEAN (Openness, Conscientiousness, Extroversion, Agreeableness, Neuroticism) [Wiggins96] y a été incorporé [Durupinar08]. Les paramètres à modifier sont ainsi passés de douze variables bas niveau à seulement cinq qui sont beaucoup plus intuitives et qui ne nécessitent pas la connaissance approfondie de HiDAC. Allbeck a ensuite permis aux agents d'effectuer des actions dans l'environnement (manger, aller à des réunions, etc), au lieu de simplement le traverser [Allbeck10].

D. AUTRES APPROCHES

Bien que populaire, l'approche discrète n'est pas la seule utilisée. Je vais maintenant présenter d'autres méthodes, mais de manière plus brève. Je commencerai par une approche à l'opposé des agents, où la foule est vue comme un système continu (continuum crowds). Je parlerai ensuite de l'union de ces deux approches avec la dynamique globale (aggregate dynamics) avant de terminer sur deux approches plus originales : les patches de foules et l'imitation de vidéos.

D-1. DYNAMIQUE CONTINUE

Avec les foules à dynamique continue, l'objectif de Treuille, Cooper et Popovic est de simuler un très grand nombre de piétons homogènes sans avoir à expliciter de règles pour l'évitement des collisions. Se basant sur les travaux de Hughes, ils voient la foule comme un système continu [Hughes03]. Dans leur modèle la planification globale de chemin et l'évitement local de collision sont unifiés dans une seule et même structure appelée champs de potentiel dynamique [Treuille06]. Leur modèle mathématique est basé sur trois hypothèses :

- Chaque personne essaie d'atteindre un point géographique précis.
- Les gens se déplacent le plus rapidement possible.
- Il existe un champ d'inconfort g qui fait que, si les autres conditions sont équivalentes, un personne préfère être au point x plutôt qu'au point x' quand $g(x) < g(x')$.

Ainsi les personnes se déplacent en essayant de minimiser la longueur totale du chemin, le temps total pour arriver à destination et l'inconfort ressenti le long du trajet. Ceci revient à minimiser l'expression suivante :

$$\alpha \int_P 1 ds + \beta \int_P 1 dt + \gamma \int_P g \cdot dt$$

Le premier terme correspond à la longueur du chemin, le second au temps total et le dernier à l'inconfort. P est l'ensemble des chemins entre un point x donné et la destination, ds signifie que l'intégrale est calculée en fonction de la longueur, tandis que dt veut dire qu'elle l'est par rapport au temps. Ces deux valeurs sont reliés par $ds = f \cdot dt$ où f est la vitesse. Chaque intégrale est pondérée par un coefficient (α, β, γ) en fonction de son importance. Cette expression peut être simplifiée par :

$$\int_P C \cdot ds, \text{ où } C \equiv \frac{\alpha \cdot f + \beta + \gamma \cdot g}{f}$$

C est appelé champ de coût unitaire. Si on définit une fonction de potentiel $\Phi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ qui vaut 0 dans la zone cible et qui satisfait $\|\nabla \cdot \Phi(x)\| = C$ alors tous les chemins optimaux vers la cible suivent le gradient de cette fonction.

Treuille, Cooper et Popovic discrétisent ce modèle à l'aide de grilles régulières. A chaque étape de simulation, il faut construire une grille de densité à partir des positions courantes des piétons, puis construire une grille de coût unitaire C , combiner ces grilles avec d'autres (représentant les zones cibles, les limites, etc) pour former la grille de potentiel et enfin utiliser ce champ de potentiel pour mettre à jour les positions des piétons. Tout ceci est résumé par la figure 12.

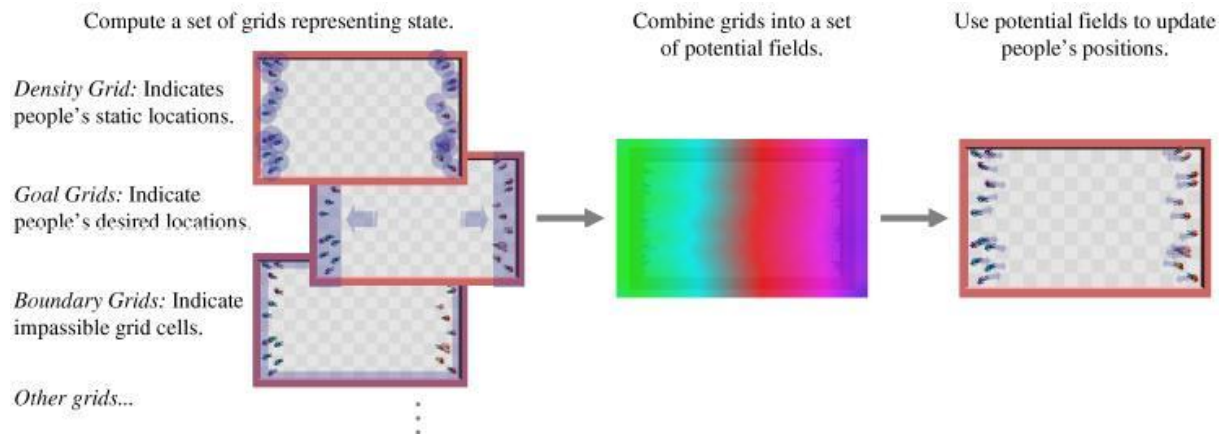


Fig. 12 – Vue d'ensemble de l'algorithme

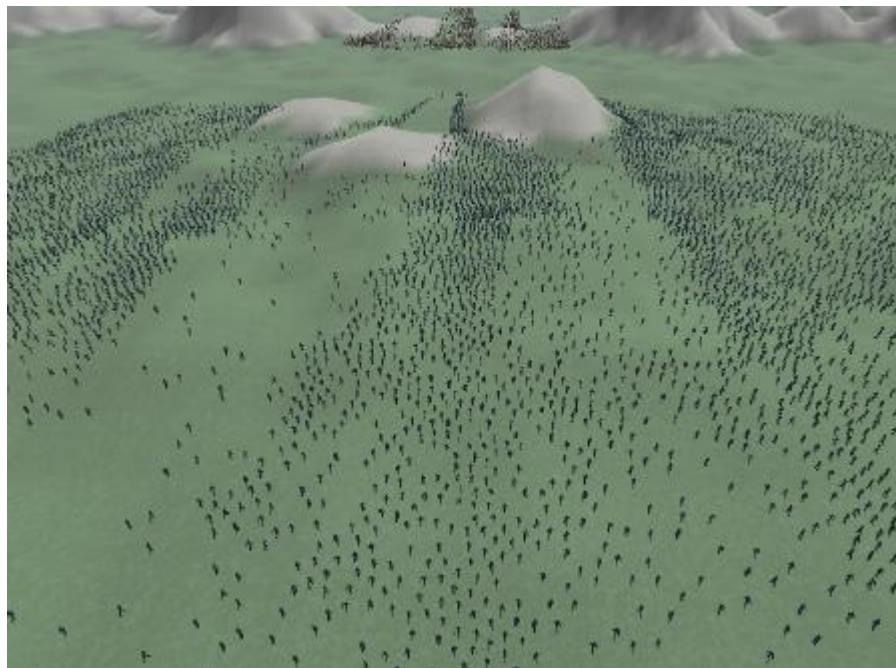


Fig. 13 – 8 000 personnes en poursuivant 2 000 autres.

Cette méthode parvient à simuler 10 000 personnes (une armée de 8 000 soldats poursuivant un plus petit groupe de 2 000, figure 13) à 12 fps. Elle n'a pas la flexibilité des approches agents mais est conçue pour modéliser de grands groupes homogènes.

D-2. DYNAMIQUE GLOBALE

Rahul Narain et ses collègues ont quant à eux adopté les deux approches à la fois : à la représentation classique d'une foule par des agents ils ont ajouté une représentation continue de la densité et de la vitesse du flux de piétons [Narain09]. Ils ont en fait mappé l'évitement de collision local dans le domaine continu afin d'obtenir *une contrainte unilatérale d'incompressibilité* (UIC). Cette contrainte agit à grande échelle et permet d'accélérer la simulation. L'idée est de reproduire le fait que, à haute densité, les piétons ont une liberté de mouvement réduite.

La première étape consiste à calculer le vecteur vitesse désiré v_i^d (preferred velocity) de chaque agent i . La méthode utilisée pour ce calcul importe peu sur le résultat final, cela peut-être une approche continue, un module de navigation ou même un script. Ensuite, à partir de ces vitesses et de la densité est construite une grille correspondant à une discrétisation de la surface sur laquelle les marcheurs se déplacent (splating). Cette grille est appelée champ de flux. La contrainte unilatérale exprime le fait que la densité ρ ne peut pas être supérieure à un certain maximum qui est fonction de la distance minimale entre deux piétons d_{\min} et d'une constante $\alpha < 1$ (qui assure le fait que l'état où la foule est parfaitement serrée est rarement atteint).

$$\rho \leq \rho_{\max} = \frac{2\alpha}{\sqrt{3}d_{\min}^2}$$

Il faut maintenant appliquer cette contrainte au champ de flux. En supposant que le nombre total d'agents est constant et que chaque agent parcourt le plus de distance possible dans la direction de son vecteur vitesse désiré, la solution est alors de la forme :

$$v = v_{\max} \frac{v^d - \nabla p}{\|v^d - \nabla p\|}$$

La vitesse maximale est notée v_{\max} , v^d est la vitesse du champ de flux avant la projection de la contrainte et p est la « pression » scalaire, $p > 0$ signifiant que la densité a atteint le maximum autorisé par la contrainte d'incompressibilité. Une fois le nouveau champ de flux calculé, la dernière étape consiste à retrouver pour chaque agent i le vecteur vitesse final v_i . On le définit le comme une interpolation du vecteur vitesse désiré et du champ de flux contraint à la position x_i de l'agent.

$$v_i = v_i^d + \frac{\rho(x_i)}{\rho_{\max}} (v(x_i) - v_i^d)$$

Les piétons vont alors se déplacer en suivant ce nouveau vecteur vitesse. L'algorithme est résumé par la figure 14.

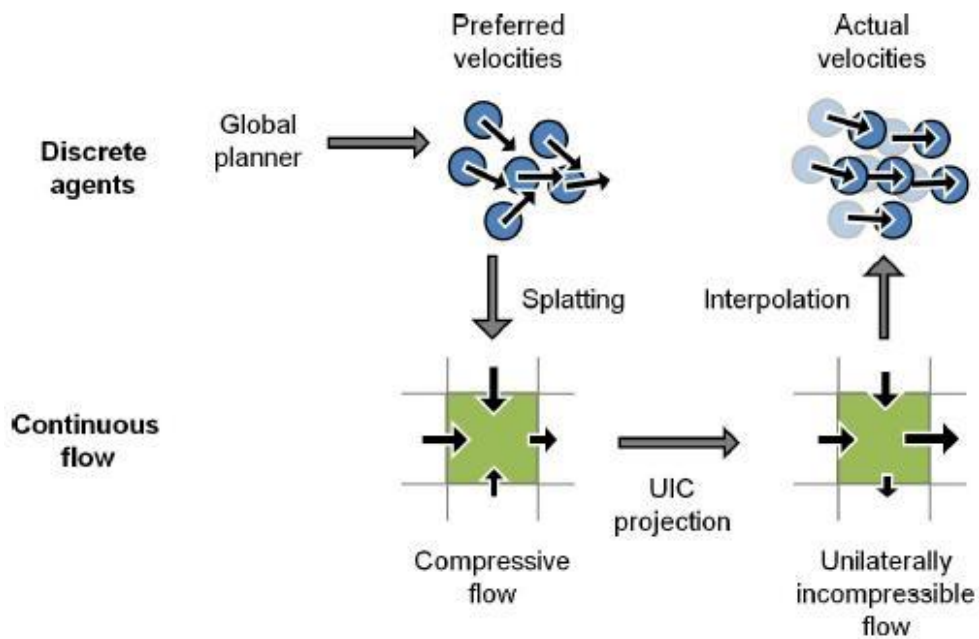


Fig. 14 – Vue d'ensemble de l'algorithme de dynamique globale

Ce modèle permet de générer des foules comptant jusqu'à 100 000 agents mais à seulement 2 fps. Pour conserver un rafraîchissement d'environ trente images par seconde il faut se limiter à environ 10 000 agents (figure 15). Les performances varient considérablement selon que l'environnement contienne des obstacles ou non.



Fig. 15 – 10 000 personnages se déplaçant dans des directions opposées.

D-3. PATCHS DE FOULE

Dans le but de peupler des environnements virtuels pouvant atteindre de très grandes dimensions, Yersin, Pettré et Thalmann ont développé la technique des patches de foule (crowd patches) [Yersin09]. Cette méthode pré-calculé un certain nombre d'éléments (comme les trajectoires) et les réutilise à la volée, permettant ainsi la génération du monde et de ses « habitants » en temps-réel pendant l'exécution.

Les données pré-calculées se présentent sous forme de *patches*, c'est-à-dire un morceau de surface contenant l'ensemble des positions des agents en fonction du temps. Toutes les trajectoires sont cycliques, leur point d'arrivée et leur point de départ sont confondus. De cette manière elles peuvent être jouées périodiquement. On distingue deux types de mobile dans un patch : les objets endogènes dont la trajectoire est entièrement comprise à l'intérieur du patch, et les objets exogènes qui peuvent sortir du patch (figure 16).

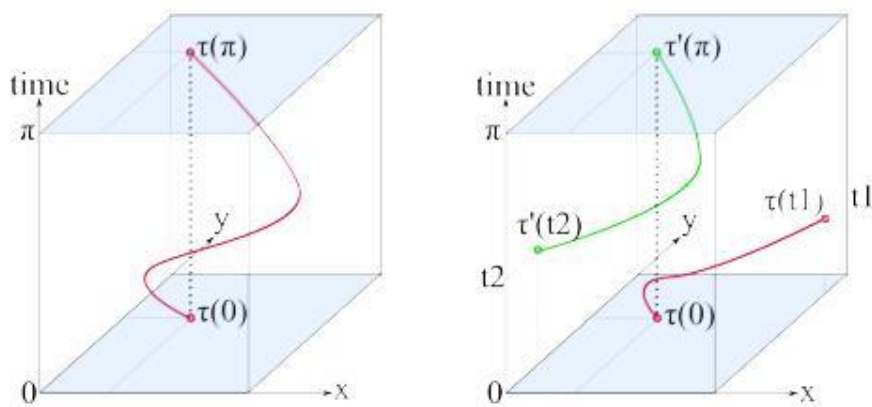


Fig. 16 – Exemples de patches. L'axe vertical représente le temps. Le patch de gauche contient un mobile endogène. Celui de droite de droite contient un mobile exogène : il sort du patch au temps $t1$ et y retourne au temps $t2$.

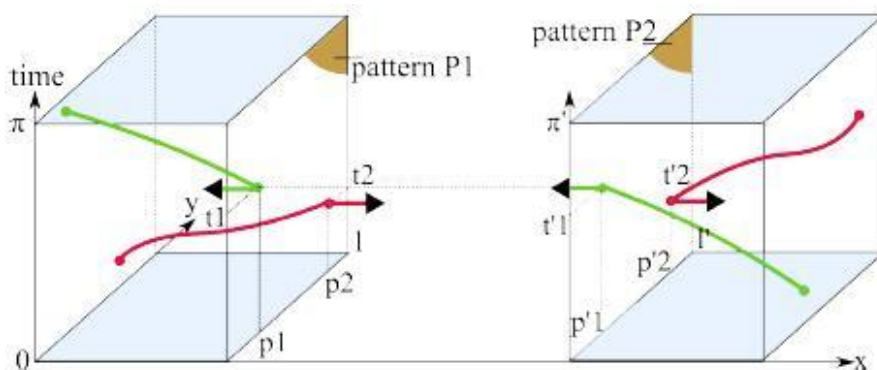


Fig. 17 – Connexion de patch partageant des patterns miroirs.

Des patterns sont définis afin de permettre la connexion des patches entre eux. Un pattern est défini pour chaque face du patch par sa longueur, sa durée et ainsi que par un ensemble de couples (position, temps) de points entrants et un autre de points sortants. Deux patterns sont dits miroirs si ils sont de même longueur et de même durée, et si l'ensemble des points entrants du premier est égal à l'ensemble des points sortants du deuxième et inversement. Si deux faces (de deux patches différents)

présentent des patterns miroirs, alors elles peuvent être adjacentes et les deux patches sont connectables (figure 17).

Les patches peuvent avoir la forme de n'importe quel polygone convexe. Le monde est construit en les assemblant. Il y a deux manières de le faire : l'approche bottom-up où on les assemble itérativement, et l'approche top-down où on découpe une zone prédéfinie (figure 18).

Pendant l'exécution, les patches sont introduits dans la scène là où la caméra regarde. On cherche d'abord dans la bibliothèque pré-calculée, si aucun ne correspond, il est créé à la volée.

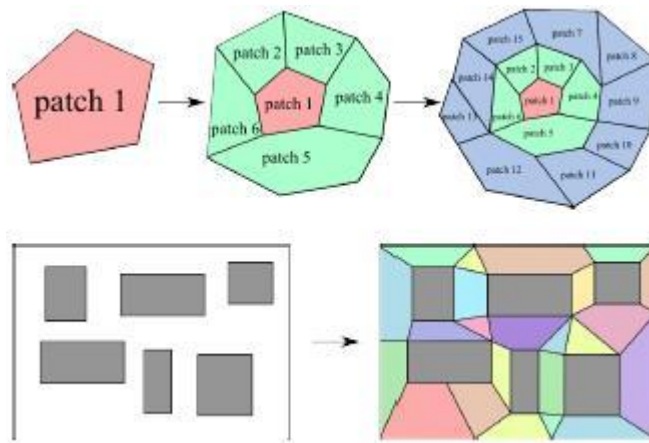


Fig. 18 – Deux manières d'assembler les patches : approche bottom-up (haut) et approche top-down (bas).

Cette méthode permet de générer des environnements peuplés de taille potentiellement infinie mais les humains virtuels n'ont aucune autonomie. Près de 3 000 piétons ont pu être simulés, à 20 fps, sachant que la simulation ne consomme que 5 à 10 % des ressources (le reste étant pour le rendu).

D-4. FOULES PAR L'EXEMPLE

Lerner, Chrysanthou et Lischinski parviennent à générer des comportements très variés qui ne sont généralement pas pris en compte, comme s'arrêter quelques secondes pour regarder une vitrine, avoir une trajectoire chaotique parce qu'on est perdu, faire brusquement demi-tour, etc [Lerner07].

L'idée est de recopier le comportement de piétons réels directement à partir de vidéos. Dans un premier temps, il faut construire une base de données dans laquelle seront stockés des exemples. Ces exemples sont construits d'après les trajectoires extraites des vidéos, ils forment un ensemble de situations. Pendant l'exécution, à chaque pas de simulation, les piétons perçoivent une situation vécue (position, orientation et vitesse des voisins, obstacles). Ils construisent et envoient alors une requête à la base de données pour trouver un exemple correspondant à la situation vécue. Il ne leur reste plus qu'à copier et à suivre la trajectoire donnée par l'exemple (figure 19).

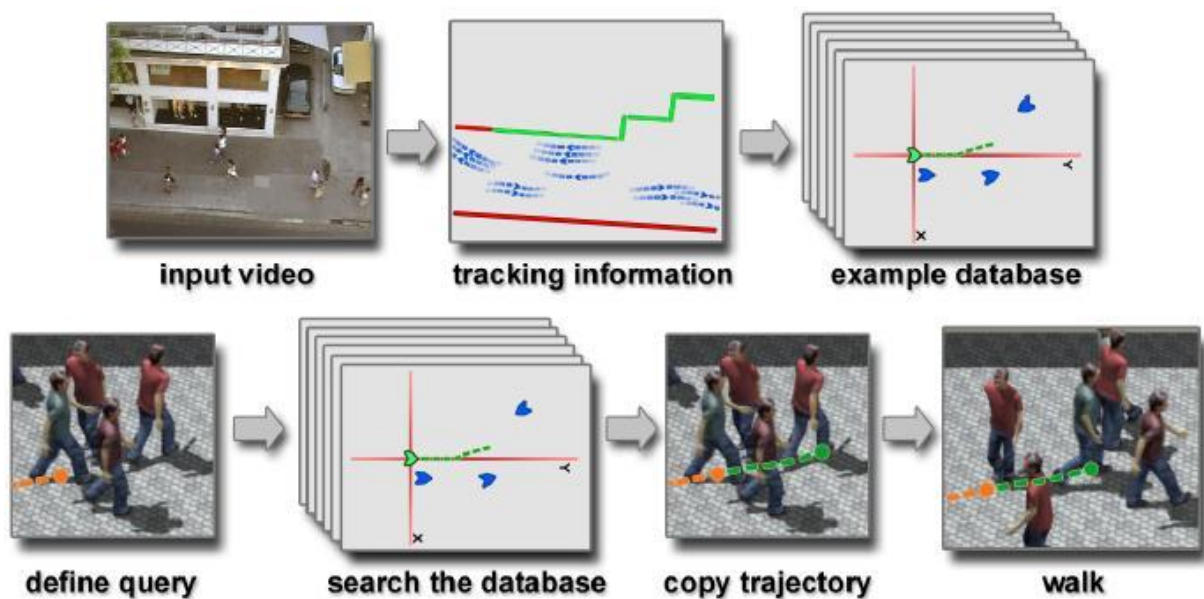


Fig. 19 – La méthode de foules par l'exemple

Les points clés de cette méthode sont la construction des exemples, la construction de la requête et surtout la définition des critères de ressemblance entre situation vécue et exemples. Plus la base de données contient de situations, plus les comportements seront précis et réalistes, mais la recherche sera d'autant plus longue à effectuer.

Cette technique donne des résultats très réalistes, mais pour un nombre très limité de piétons (une quarantaine), et ne tourne pas en temps réel.

E. CONCLUSION

Plusieurs éléments manquent encore à la majorité des simulations existantes, quelle que soit leur approche : des piétons formant des petits groupes et se déplaçant à plusieurs, des piétons fortement hétérogènes (autant dans le comportement que dans l'apparence), et enfin des perturbations singulières dans le comportement (arrêt impromptu, personne « indisciplinée », etc). La figure 20 récapitule les caractéristiques principales des différents modèles présentés précédemment. La colonne Qualité correspond à la plausibilité des déplacements observés et la colonne Interactivité aux possibilités d'édition et de contrôle manuel.

	Nb. de piétons max.	Temps réel	Interactivité	Qualité	Hétérogénéité	Groupes	Perturbations
Shao & Terzopoulos	1200 (sans rendu 3D)	Oui (sans rendu 3D)	Moyenne	Assez Bonne	Moyenne	Non	Non
HIDAC	600	Oui	Bonne	Bonne	Moyenne	Non	Oui
Dynamique continue	10000	Non	Faible	Faible	Nulle	Non	Non
Dynamique globale	100000	Entre 0 et 10k agents	Faible	Faible	Nulle	Non	Non
Patchs de foule	3000	Quasi	Nulle	Faible	Moyenne	Non	Non
Foules par l'exemple	40	Non	Nulle	Bonne	Faible	Non	Oui

Fig. 20 – Tableau récapitulatif

L'approche par agents permet de faire des foules très réalistes et sophistiquées, où chaque individu prend des décisions qui lui sont propres en fonction de ses buts personnels. Cependant, calculer les mouvements et les décisions de chaque agent séparément est très coûteux, il n'est pas possible de simuler des foules de plusieurs dizaines de milliers de personnes en temps réel. Il est également difficile de gérer des foules ayant un but commun, comme une armée, car il faut expliciter les comportements de chaque individu. A l'inverse, les méthodes s'appuyant sur la dynamique continue permettent de simuler facilement de larges foules agissant de concert tout en permettant, si ce n'est le temps réel, au moins l'interactivité. Mais il ne faut pas que l'œil s'attarde sur les détails, le résultat est bien moins réaliste.



Fig. 21 – Deux besoins de simulation différents : à gauche une ville du jeu vidéo Red Dead Redemption, à droite un plan large du film Les Deux Tours.

Aujourd'hui, malgré la grande variété de méthodes, aucun modèle ne permet de générer des foules à la fois réalistes et de très grande taille (sans même parler du temps-réel). Comme souvent, il faut faire un compromis entre quantité et qualité et s'adapter aux besoins. Par exemple, simuler une grande armée pour un plan large d'un film serait plutôt réalisable avec une foule continue, tandis que peupler une ville pour un jeu vidéo nécessiterait des agents autonomes et bien différenciés (figure 21).

La navigation des piétons est un phénomène complexe qui reste encore mal connu des scientifiques. Cette méconnaissance constitue à la fois la principale difficulté et le principal enjeu de sa modélisation. Les simulations sont difficiles à réaliser mais elles aident à mieux comprendre la réalité.

III. TRAVAIL RÉALISÉ

A. INTRODUCTION

A-1. ETAT INITIAL DU PROJET

Le projet de ville virtuelle se compose d'un modèle d'environnement urbain, de modèles de voitures et de modèles de piétons. Le corps des piétons est animé par de la capture de mouvements. Le module cinématique de Bullet Physics (un moteur physique) a été intégré pour gérer le déplacement des objets et la détection de collisions : les objets ne traversent pas l'environnement, se bloquent ou s'élèvent lorsqu'ils rencontrent un autre objet (je reviendrai plus tard sur les avantages et inconvénients d'un moteur physique). Chaque piéton dispose d'un ensemble de cibles. Il rejoint sa cible courante en ligne droite. Lorsqu'il est bloqué par un obstacle, soit il essaie différentes directions jusqu'à en trouver une qui lui permette d'avancer, soit le moteur physique le fait passer par-dessus. Comme expliqué dans la partie I-C, cela donne des comportements très peu réalistes et mène à des cas de blocage. L'objectif est de corriger ceci.

Les agents sont également capables de percevoir les autres piétons et certains objets de l'environnement (comme les feux tricolores) qui sont situés devant eux, dans un champ triangulaire dont la taille et l'angle d'ouverture sont paramétrables. Cependant les informations perçues restent basiques et ne sont pas réutilisées ensuite.

Le projet est entièrement codé en C++ sous Windows, l'IDE utilisé est Eclipse.

A-2. PREMIÈRES PISTES

Lors des premières réunions un système réactif doublé d'un système d'apprentissage a été évoqué, le deuxième prenant le relai du premier en cas de blocage. Mais cette idée a rapidement été abandonnée en raison de la difficulté à détecter assez tôt les blocages. Je me suis vite rendu compte de deux aspects importants pour le réalisme : la différenciation des piétons et les déplacements par petit groupe. De nombreuses questions se posent alors. Par exemple, sur quels critères différencier les agents ? comment altérer leur trajectoire ? comment les faire marcher en groupe ?... Outre la recherche bibliographique et la prise en main du code (ajout de fonctionnalités simples, comme l'utilisation de fichiers textes pour initialiser la simulation), les premières semaines du stage furent consacrées au tri des (trop) nombreuses idées et questions qui me venaient à l'esprit afin de se concentrer sur l'essentiel.

Très tôt, la première solution codée était une discrétisation de l'espace en grille 2D, chaque cellule gardant en mémoire le nombre de piétons présents à l'intérieur. Les agents percevaient ces le nombre de piétons présents sur les cellules proches et choisissaient la moins encombrée. Mais cette technique donnait des trajectoires bizarres et beaucoup d'oscillations (les piétons changeaient de direction plusieurs fois rapidement avant d'en maintenir une), elle fut rapidement abandonnée au profit d'une autre méthode.

A-3. CHOIX DE L'APPROCHE

La décision d'adopter une approche agent s'est imposée naturellement petit à petit au cours de mes lectures. Premièrement elle est plus intuitive, et me paraissait plus facile à mettre en place. Deuxièmement, le code existant se prêtait plus à cette approche, puisque chaque individu avait une liste de cibles qui lui était propre et était doté de capacités de perception. Enfin, elle correspond plus à ma vision personnelle des problèmes de simulation ; je privilégie la compréhension des mécanismes sous-jacents à l'aspect global du système. Les techniques utilisant cette approche manquent souvent de généralité, elles nécessitent un environnement spécifique. Je voulais pour ma part un algorithme qui puisse être facilement implémenté dans tout type d'environnement.

Ma volonté était de combler à la fois les manques généraux, exposés dans la partie II-E (déplacements à plusieurs, hétérogénéité, perturbations), et les manques spécifiques au projet (qui correspondraient aux étages Comportement et Cognition de la figure 5). Je voulais également proposer une méthode simple et intuitive, aussi proche que possible de la réalité dans ses mécanismes.

Après avoir décrit la nouvelle technique dans les parties B, C et D, je conclurai en présentant les résultats et en parlant des principales difficultés que j'ai rencontrées.

B. OBSERVATIONS

Afin d'avoir des données concrètes comme base de réflexion, je me suis rendu dans le centre-ville de Toulouse et j'ai enregistré des vidéos de passants à autour de la station de métro Jean Jaurès. Ce n'était pas une heure de pointe, la densité de piéton était donc de faible à moyenne. Ces vidéos ont mis en lumière l'importance de la différenciation des piétons, autant sur le plan visuel que comportemental. Leur analyse a permis d'extraire des informations importantes comme la répartition des groupes (figure 22) ainsi qu'un début de réponse à la différenciation : trois stratégies de déplacement, décrites ci-après.

Stratégie 1, dite « lente » :

La personne avance à vitesse réduite, elle ne cherche pas à éviter les autres passants, étant elle-même un obstacle pour le reste de la circulation piétonne.

Stratégie 2, dite « classique » :

La personne marche à vitesse moyenne, elle suit une « bulle d'air » qui se forme devant elle à mesure que les piétons de devant avancent. Elle double les plus lents mais reste sur le trottoir et les passages piétons.

Stratégie 3, dite « rapide » :

La personne marche vite. Elle double beaucoup, quitte à faire des « zigs-zags », à marcher sur la route ou à faire des détours.

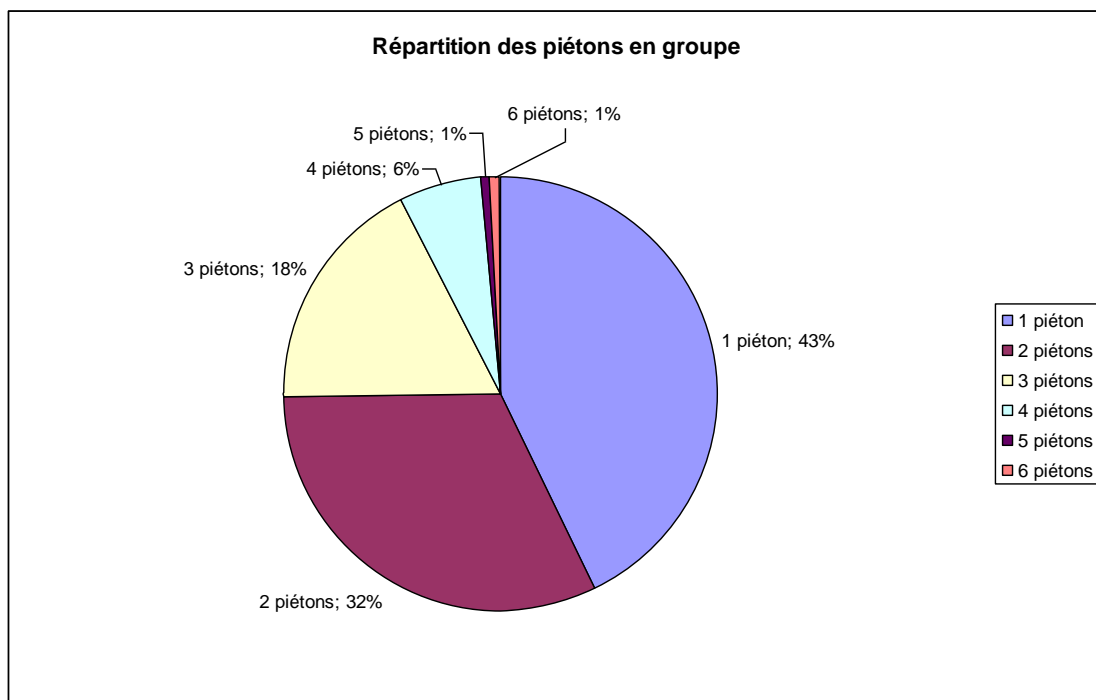


Fig. 22 – Graphique de la répartition des piétons en groupe. On voit que près de 60% des personnes marchent accompagnées, dont plus de la moitié en couple et environ le tiers en groupe de trois. Comptage effectué sur un ensemble de sept vidéos tournées dans le centre-ville de Toulouse pour une durée globale d'environ vingt minutes et un total de 726 piétons.

Ces vidéos m'ont également permis de m'apercevoir que, lorsqu'ils s'arrêtent à un passage piéton, les passants privilégient leur trajectoire courante plutôt que l'espace disponible : ils préfèrent s'arrêter derrière quelqu'un plutôt que s'incruster dans un petit espace pour être plus proche du bord. Enfin, on voit que la grande majorité des piétons adoptent la stratégie classique, les piétons très lents ou très rapides restent rares.

C. COMPORTEMENTS RÉACTIFS

C-1. ÉVITER LES OBSTACLES

C-1.1 DIRECTIONS LIBRES ET DIRECTION DÉSIRÉE

Le premier point à régler était l'évitement d'obstacles. Pour y arriver, je me suis basé sur l'idée qu'un marcheur suit une « bulle d'air » créée par ceux qui le précèdent : il privilégie les directions libres. Ces directions libres sont représentées par un tableau. Chaque case correspond à une direction et contient la distance maximale que l'agent pourrait parcourir en la suivant avant de rencontrer un obstacle (figure 23). À chaque pas de simulation, l'agent calcule sa direction désirée d_d (celle qui lui permet d'atteindre sa cible) et la projette dans le tableau. S'il peut la suivre sans rencontrer d'obstacle (c'est-à-dire si la case correspondant à d_d contient la distance maximale), alors il la conserve, sinon il cherche dans le tableau la direction libre la plus proche d_{libre} . La direction finale empruntée est une moyenne pondérée de d_d et d_{libre} :

$$d_f = \alpha.d_d + \beta.d_{libre}$$

Où α et β sont supérieurs à 0 et vérifient $\alpha + \beta = 1$. Leur valeur dépend de la distance à l'obstacle : plus l'obstacle est proche, plus l'écart pour l'éviter doit être important, donc plus β est grand (et α petit), et inversement.

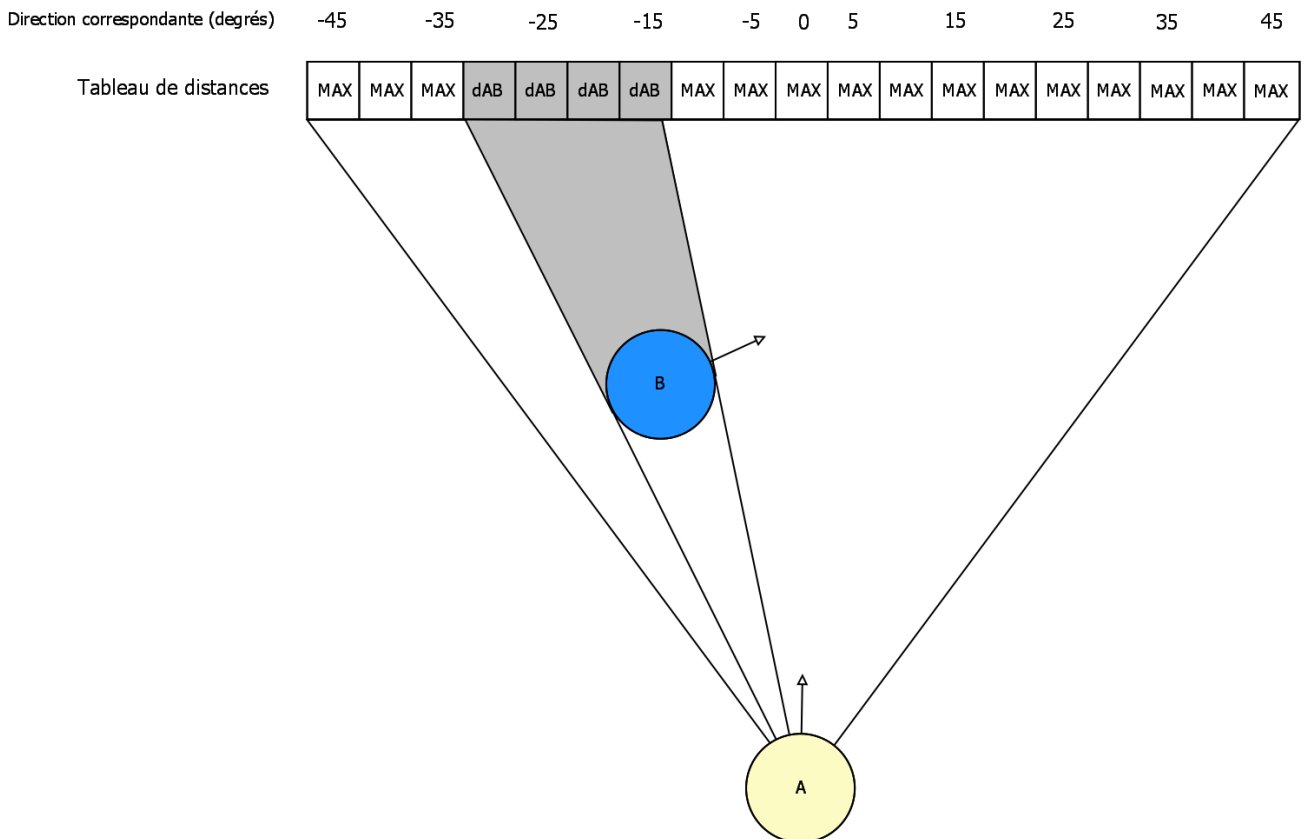


Fig. 23 – Le piéton A perçoit le piéton B sur sa gauche. Certaines cases de la première moitié du tableau contiennent alors la distance AB. Les flèches indiquent l'orientation courante, la direction désirée n'est pas représentée.

Si il y a une ambiguïté lors calcul de d_{libre} (deux cases libres à la même distance de la case de la direction désirée), c'est la case avec l'indice le plus grand (donc correspondant à l'orientation la plus à droite) qui est choisie. Ceci permet de simuler la « préférence à droite », tendance naturelle qu'ont les personnes à contourner les obstacles par la droite plutôt que par la gauche lorsque les deux solutions sont équivalentes.

Un piéton peut être amené à ajuster sa trajectoire même si sa direction désirée est libre. En effet, si une case directement voisine de celle correspondant à sa direction désirée est pleine, alors il décalera son orientation d'un cran vers l'autre côté. Ceci a pour but de fluidifier les modifications de trajectoire. Afin d'éviter des changements de directions inutiles, dus aux objets lointains, le tableau doit être initialisé avec une distance maximale relativement faible (de l'ordre de trois mètres dans ma simulation). Enfin, le nombre de cases du tableau dépend du pas de valeur angulaire souhaité entre chaque case ainsi que de l'angle d'ouverture du champ de perception. Si le pas est trop petit, les agents ne modifient ni assez souvent ni assez fortement leur trajectoire, s'il est trop grand c'est l'inverse. Un pas de cinq degrés s'est avéré être le meilleur compromis.

C-1.2 ANTICIPATION

Une grande partie des collisions est évitée avec la technique expliquée dans la partie précédente. Cependant, dans certains cas il arrive qu'au lieu d'en éviter, elle en provoque. Par exemple, dans la figure 23, si l'agent B était légèrement plus à droite (mais toujours sur la gauche de A), le piéton A devrait ajuster sa trajectoire vers la droite et finirait par entrer en collision avec B car celui-ci avance vers la droite.

Pour remédier à ce problème, j'ai donné aux piétons la possibilité de percevoir la vitesse et la direction des autres agents. À partir de ces informations ils extrapolent la future position des piétons et peuvent réagir de manière plus efficace. Par exemple, dans la figure 24, A perçoit B sur sa gauche et anticipe sa future position (qui sera à droite). Il va alors ajuster sa trajectoire vers la gauche, et passera derrière B. Sans anticipation A tournerait vers la droite et entrerait en collision avec B.

Les agents n'effectuent pas systématiquement le calcul des positions anticipées car celui-ci est parfois inutile. L'anticipation n'est pas réalisée lorsque l'agent perçu suit une trajectoire parallèle (ou presque) à celle de celui qui perçoit et arrive en sens opposé. Le pas d'anticipation varie selon les situations : plus l'angle formé par les trajectoires est proche de 90° , plus l'anticipation est forte; et plus la distance au piéton est faible, plus l'anticipation est faible.

Grâce à cette technique, obstacles statiques et mobiles sont traités de la même manière, par le même tableau de directions à ceci-près qu'aucune anticipation n'est effectuée pour les obstacles statiques (étant donné que leur vitesse est nulle).

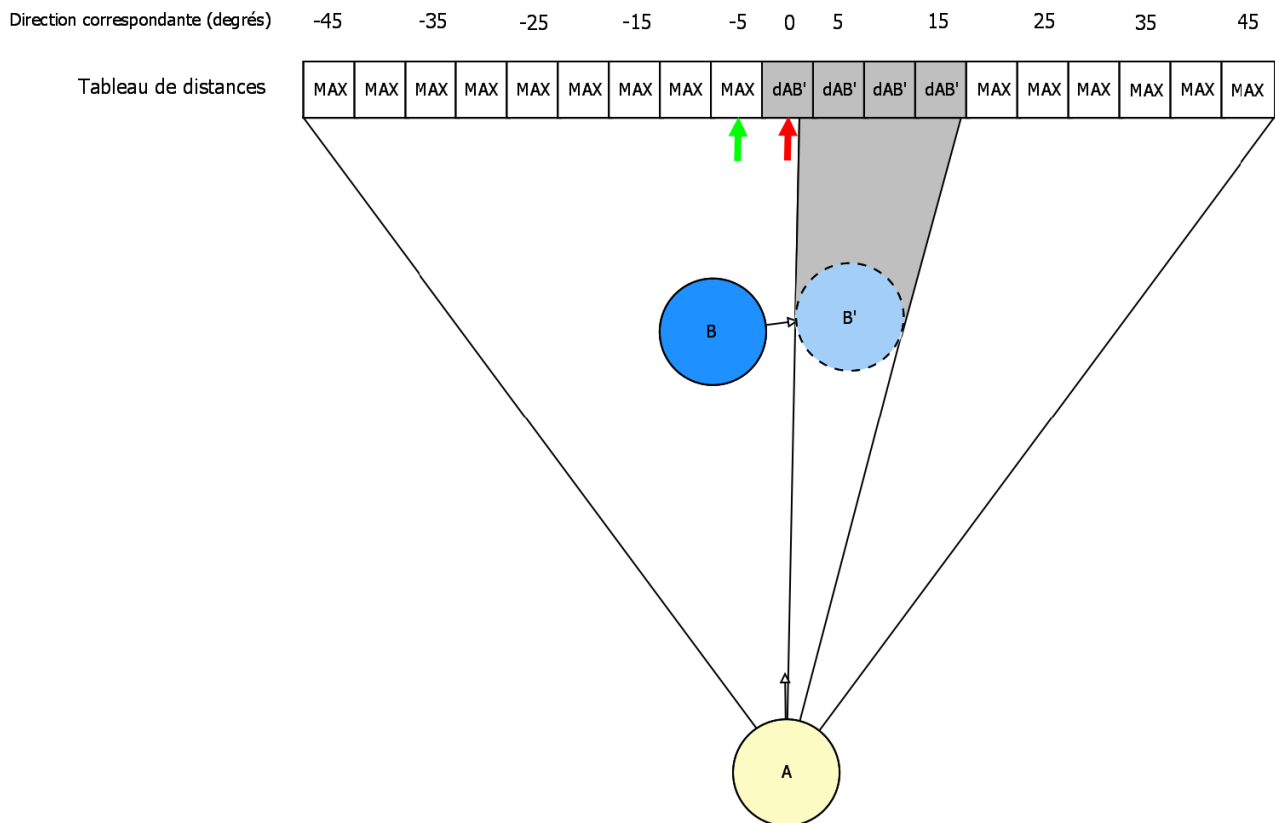


Fig. 24 – Le piéton A anticipe la position du piéton B et décale sa trajectoire vers la gauche. B' est la position anticipée de B, la flèche rouge indique la case de la direction désirée de A, la flèche verte indique la direction libre.

C-2. COMPORTEMENTS RÉACTIFS SECONDAIRES

C-2.1 RESTER DANS LES ZONES SÛRES

Le système d'évitement des piétons a un effet secondaire gênant : les agents ont tendance à s'éparpiller et finissent sur la route, en dehors de ce que j'appelle le « réseau piéton » (trottoirs et passages piétons). Or rester dans les zones appropriées est un critère de réalisme important (voir II-B-1). Pour remédier à ce problème j'ai marqué les bordures des trottoirs et les limites des passages piétons avec des « cellules ». Ces cellules sont vues par les agents comme des obstacles, elles sont traitées de la même manière que les piétons, avec le même tableau de directions. Ainsi les agents restent naturellement sur les trottoirs et les passages piétons : lorsqu'ils approchent des bordures, ils ajustent de manière fluide leur trajectoire pour rester dans les zones appropriées.

Toutefois, les cellules ne constituent pas des obstacles physiques, elles peuvent être traversées dans plusieurs cas. En effet, le tableau de directions permet d'ajuster la trajectoire, mais pas de manière brusque. Il ne provoquera jamais de demi-tour par exemple. Si un piéton avance rapidement et perpendiculairement à une bordure, il peut être amené à marcher sur la route. En cas de forte affluence, un agent peut également se retrouver poussé sur la route. Lorsqu'un agent n'est plus sur le réseau piéton, les cellules ne sont bien sûr plus traitées par le système d'évitement, afin qu'il puisse retourner dans une zone sûre. Il définit également la cellule perçue la plus proche comme cible temporaire, de cette manière il ne reste pas indéfiniment sur la route (les cibles temporaires sont détruites lorsqu'elles sont atteintes, contrairement aux cibles permanentes qui sont parcourues en boucle).

C-2.2 RALENTISSEMENTS ET ARRÊTS

Chaque piéton calcule un taux d'encombrement en fonction du remplissage du tableau de directions (nombre de cases remplies et valeurs des distances). Le nombre de cases remplies doit être pris en compte afin d'éviter que des objets très proches mais peu encombrants provoquent un ralentissement (ce qui serait le cas avec un simple calcul de la moyenne des distances) :

$$\tau = \sum_{i=0}^N (d_{\max} - d_i) \cdot \frac{N^P}{N}$$

Où N est le nombre de cases du tableau, N^P le nombre de cases pleines, et d_{\max} la distance avec laquelle il a été initialisé. Si ce taux dépasse un premier seuil, l'agent ralentit légèrement, et s'il dépasse un second seuil, l'agent ralentit fortement. Un agent diminue également sa vitesse lorsqu'un autre piéton se trouve juste devant lui, marchant à peu près à la même vitesse et dans la même direction ; ceci afin de maintenir une certaine distance entre eux.

Un agent s'arrête lorsqu'il se trouve sur une cellule de bordure et qu'il doit traverser alors que le feu piéton est rouge. Il s'arrête également s'il est proche d'autres piétons qui attendent eux aussi de traverser (il ne va pas forcer son chemin jusqu'au bord de la route).

D. STRATÉGIES

La différenciation des piétons se fait de trois manières différentes : il existe plusieurs visuels de piétons, tous n'ont pas les mêmes capacités physiques (largeur, vitesse maximale...) et enfin tous n'ont pas le même comportement. Les trois stratégies de déplacement décrites dans la partie III-B ont été implémentées de la manière suivante :

Stratégie lente

Les piétons lents sont représentés par des personnes âgées. Leur vitesse correspond à environ la moitié de la vitesse des piétons moyens. Comme ils se déplacent moins rapidement, les piétons lents ne font attention qu'aux obstacles les plus proches d'eux : leur tableau de directions est initialisé avec une distance plus petite.

Stratégie classique

Les agents suivant cette stratégie présentent tous les comportements exposés précédemment : évitement fluide des obstacles, anticipation variable selon la situation, arrêts et ralentissements...

Stratégie rapide

Les agents rapides représentent les personnes pressées. Ils sont moins prudents et n'hésitent pas à déborder sur la route. Leur vitesse est environ 50% supérieure à celle des piétons classiques. Globalement, les piétons rapides présentent les mêmes comportements que les classiques, à ceci près qu'ils ne ralentissent pas en cas d'encombrement et que les cellules de bordure ne sont pas prises en compte. Ils peuvent donc déborder sur la route pour dépasser des personnes plus lentes par exemple (figure 25). Comme ils sont plus rapides, ils extrapolent les déplacements des autres sur un intervalle de temps plus court, puisqu'ils mettront moins de temps à parvenir (figure 26).

Pour obtenir une simulation proche de la réalité, le nombre d'agents suivant chaque stratégie doit être équivalent à ce qui est observé dans la réalité (une forte proportion de piétons classiques, peu de piétons lents ou rapides). Pour ma part, j'utilise environ 80% de piétons classiques, 10% de lents et 10% de rapides.

Les agents sont capables de changer de comportement à la volée. Par exemple, à l'approche d'un feu rouge ils ne cherchent plus à éviter les obstacles mais suivent leur trajectoire courante jusqu'à devoir s'arrêter au bord de la route ou derrière quelqu'un d'autre. De cette manière, leur agencement sur le trottoir est réaliste, et ils ne changent pas de direction inutilement, conformément aux observations sur les vidéos.



Fig. 25 – A gauche, un piéton suivant la stratégie rapide effectue un dépassement en débordant sur la rout

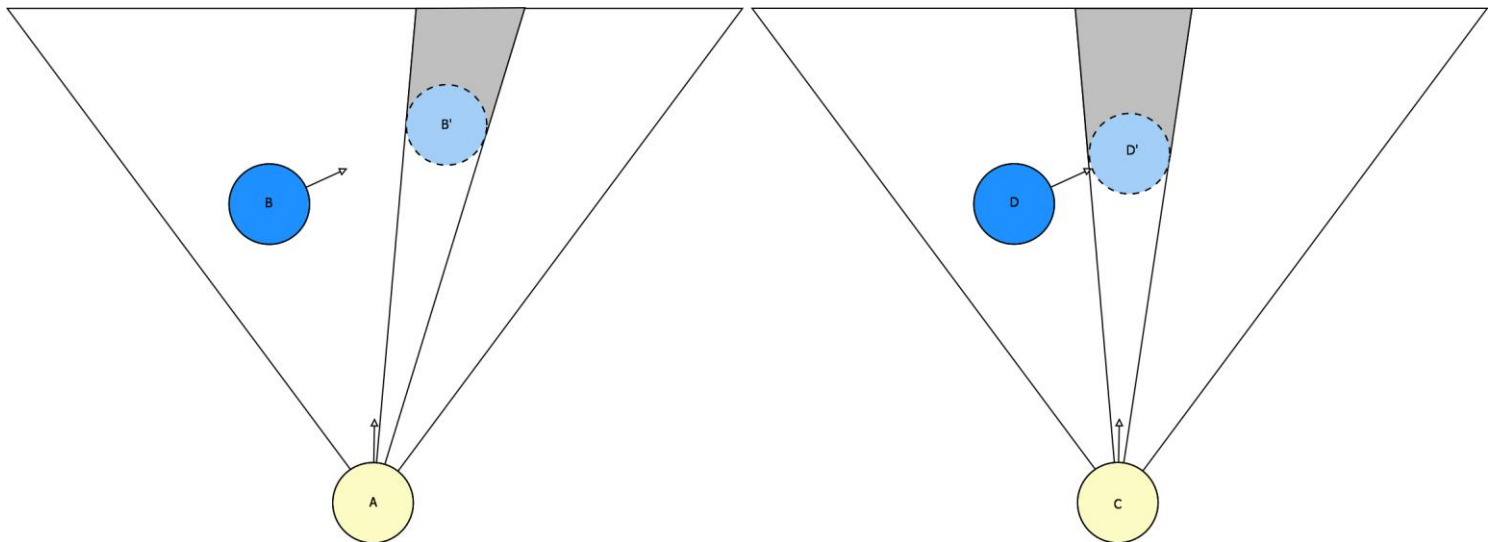


Fig. 26 – Comparaison de l'anticipation d'un agent classique (gauche) et d'un agent pressé (droite). B' et D' sont respectivement les positions anticipées de B et D. Le piéton C avance plus rapidement, il mettra moins de temps que A pour arriver à hauteur du piéton qui fait obstacle : il doit donc anticiper sur une durée plus courte.

E. SE DÉPLACER À PLUSIEURS

E-1. FONCTIONNEMENT

Un groupe comprend deux à cinq personnes. Il est constitué d'un leader et de membres. C'est le leader qui décide de la vitesse et de la direction à adopter, les autres « copient » ses gestes (figure 27). Les piétons seuls perçoivent le groupe comme un seul obstacle (figure 28), ils tentent de l'éviter en entier, sans le couper (figure 29). La distance groupe-piéton utilisée dans le tableau est égale à la distance minimale entre un membre du groupe et le piéton. Dans l'état actuel, le groupe ne se soucie pas des autres piétons, c'est aux autres de l'éviter. En effet, comment associer efficacement l'évitement d'obstacle de chaque individu du groupe avec la nécessité de rester ensemble est un problème encore non résolu (voir III-E-3). Les membres du groupe marchent côte à côte, en ligne, mais d'autres topologies sont prévues (carré, U).

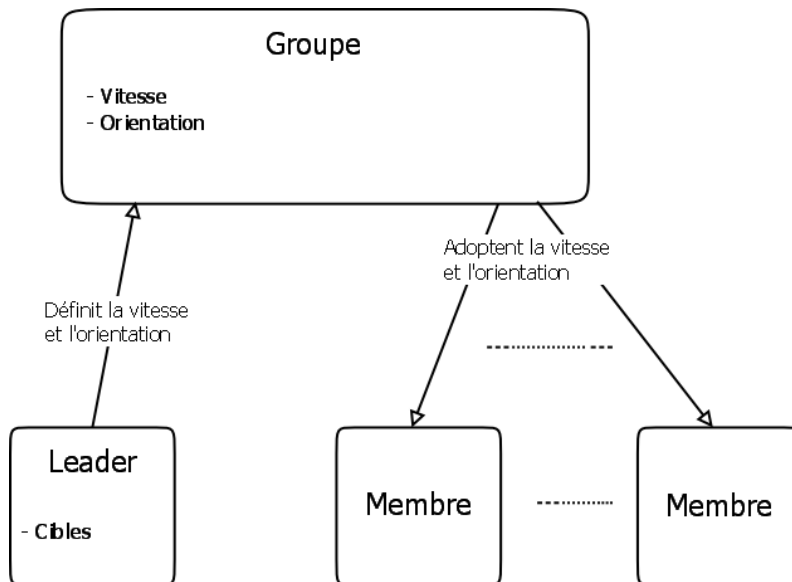


Fig. 27 – Schéma du fonctionnement d'un groupe.

Le leader perçoit les cellules de bordure et modifie sa trajectoire (et donc celle du groupe) en conséquence. Les groupes tendent ainsi à rester correctement sur le réseau piéton. Cependant, comme les membres du groupe n'effectuent pas (pour le moment) d'évitement d'obstacle, il arrive que l'un d'entre eux entre en collision avec un lampadaire par exemple et se fasse distancer par le reste du groupe. Dans ce cas, le retardataire se désolidarise du groupe (il agit comme un piéton seul), prend le leader comme cible et accélère jusqu'à le rejoindre et réintègre alors le groupe. Si la distance entre le retardataire et le groupe est trop grande, le leader s'arrête et attend.

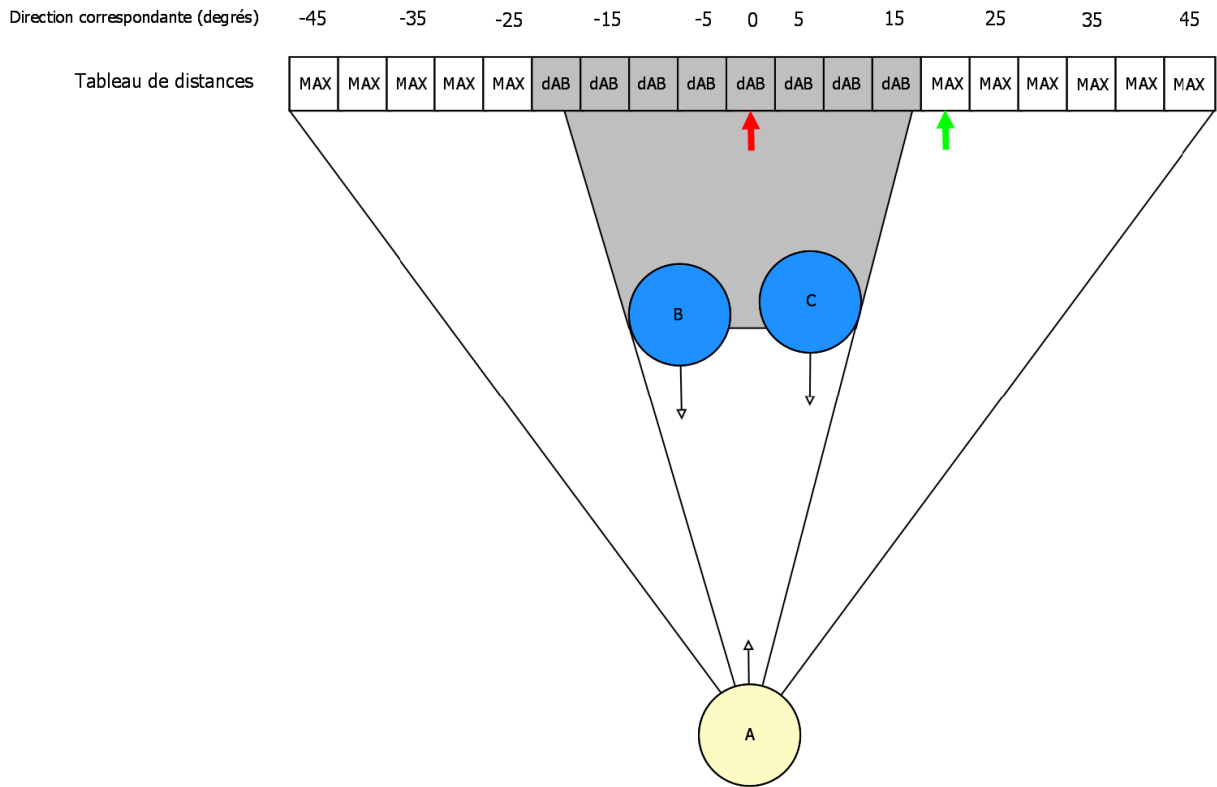


Fig. 28 – Les piétons B et C se déplacent en couple. Le piéton A les perçoit comme un seul et même obstacle.

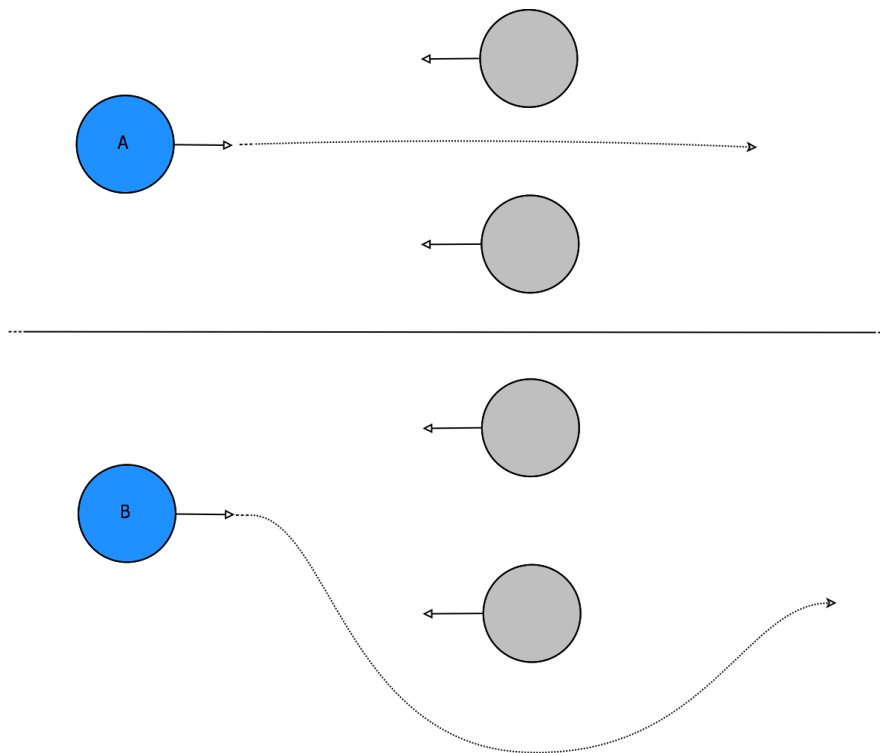


Fig. 29 – En haut, les piétons colorés en gris ne forment pas un groupe, A passe entre les deux. En bas, les piétons colorés en gris marchent en couple, B les évite. On note que, comme dans la réalité, B ne se replace pas exactement sur la même ligne.

E-2. FORMATION

Chaque agent a en mémoire une liste de personnes qu'il connaît (représentées par un numéro d'identification). Si un agent est seul (ou leader d'un groupe) et croise une des personnes mémorisées (et qu'elle ne fait pas déjà partie d'un groupe), les deux peuvent s'arrêter et repartir un petit moment plus tard en formant un groupe. Il existe deux cas de formation d'un groupe : la rencontre de deux personnes seules se connaissant (dans ce cas le leader est choisi arbitrairement), et la rencontre d'un groupe et d'une tierce personne connue du leader (dans ce cas cette personne est simplement ajoutée à la liste des membres).

Les piétons qui suivent la stratégie rapide ne s'arrêtent jamais pour former un groupe, ceux suivant la stratégie lente le font systématiquement, les autres le font une fois sur deux.

E-3. REMARQUES

Au moment d'écrire ces lignes, le déplacement à plusieurs n'a pas été entièrement implémentés et un certain nombre de questions restent ouvertes. De ce fait, les groupes ont tendance à trop se disperser/attendre et n'augmentent pas (encore) le réalisme de la simulation de manière satisfaisante.

Permettre aux agents de marcher en petit groupe est la première chose que j'ai codée au début du stage, afin de m'habituer au code, avant l'évitement d'obstacle. Je l'ai mise de côté le temps de développer tout le reste, mais la réintégration est plus difficile que prévue.

F. CONCLUSION

F-1. RÉSULTATS

Les piétons évitent de manière fluide les obstacles (statiques ou mobiles), restent globalement sur le réseau piéton et forment des petits groupes : le réalisme de la simulation est augmenté, l'objectif initial concernant le projet est atteint. On observe des comportements émergents identiques à la réalité, comme la formation de lignes (figure 31), les blocages ne surviennent plus que très rarement et durent beaucoup moins longtemps. L'arrêt au passage piéton est réaliste (figure 32) et l'effet « armée de clones » est limité par les trajectoires uniques de chaque piéton, mais tout de même présent car tous possèdent la même animation corporelle et la même silhouette.

La méthode du tableau de directions est à la fois très intuitive, proche de la réalité et générique. Elle peut facilement être mise en œuvre dans n'importe quel modèle permettant la détection d'obstacles et ne nécessite pas d'environnement sophistiqué. Elle est également plus simple que la plupart des autres approches agent : le même mécanisme gère l'évitement d'obstacles statiques, l'évitement d'obstacles mobiles, le maintien dans les zones appropriées et le contrôle de la vitesse. Les six routines pour l'évitement d'obstacles de Shao & Terzopoulos [Shao05] sont ainsi remplacées par une seule et même méthode, et la collection de cartes hiérarchiques par de simples balises sur l'environnement. Ma technique permet l'intégration de stratégies, assurant la différenciation du comportement des agents et permettant des perturbations singulières (comme une personne indisciplinée ne s'arrêtant pas au passage piéton). Chaque agent étant indépendant, il est possible d'interagir avec l'un d'entre eux (en prendre le contrôle au clavier) sans déstabiliser la simulation. Enfin, la formation de groupes est une fonctionnalité encore inédite.

Sur un ordinateur équipé d'un Intel Core 2 Duo 2,4GHz et de 2 Go de RAM, la simulation peut gérer jusqu'à une cinquantaine de piétons sans qu'il n'y ait de ralentissement notable à l'image (30 fps). Avec 75 piétons la simulation tourne à 20 fps. On conserve un taux interactif jusqu'à environ 200 agents (10 fps). La figure 30 compare les résultats de ma méthode avec celles présentées dans la partie II. On peut voir qu'elle réunit des critères que peu d'autres techniques remplissent.

	Nb. de piétons max.	Temps réel	Interactivité	Qualité	Hétérogénéité	Groupes	Perturbations
Shao & Terzopoulos	1200 (sans rendu 3D)	Oui (sans rendu 3D)	Moyenne	Assez Bonne	Moyenne	Non	Non
HiDAC	600	Oui	Bonne	Bonne	Moyenne	Non	Oui
Dynamique continue	10000	Non	Faible	Faible	Nulle	Non	Non
Dynamique globale	100000	Entre 0 et 10k agents	Faible	Faible	Nulle	Non	Non
Patchs de foule	3000	Quasi	Nulle	Faible	Moyenne	Non	Non
Foules par l'exemple	40	Non	Nulle	Bonne	Faible	Non	Oui
Ma méthode	200	Entre 0 et 100 agents	Bonne	Bonne	Assez forte	Oui (en cours)	Oui

Fig. 30 – Tableau comparatif

Quelques problèmes subsistent. Le premier concerne les groupes qui ne sont pas encore parfaitement intégrés. Lorsque le groupe se déplace, il paraît trop rigide et il arrive trop souvent qu'un membre s'en détache. Le second problème est dû à la fréquence du calcul de perception/réaction. Pour des raisons évidentes de performance, celui-ci n'est pas exécuté à chaque pas de simulation mais seulement une fois tous les quatre pas. Le gain en rapidité est important, mais le comportement devient un peu moins précis et des collisions se produisent alors, même si elles restent rares. Enfin, je n'ai presque pas fait d'optimisation dans le code, on peut donc penser qu'en améliorant l'implémentation la simulation pourrait gérer un bien plus grand nombre de piétons à un meilleur taux d'images par seconde.

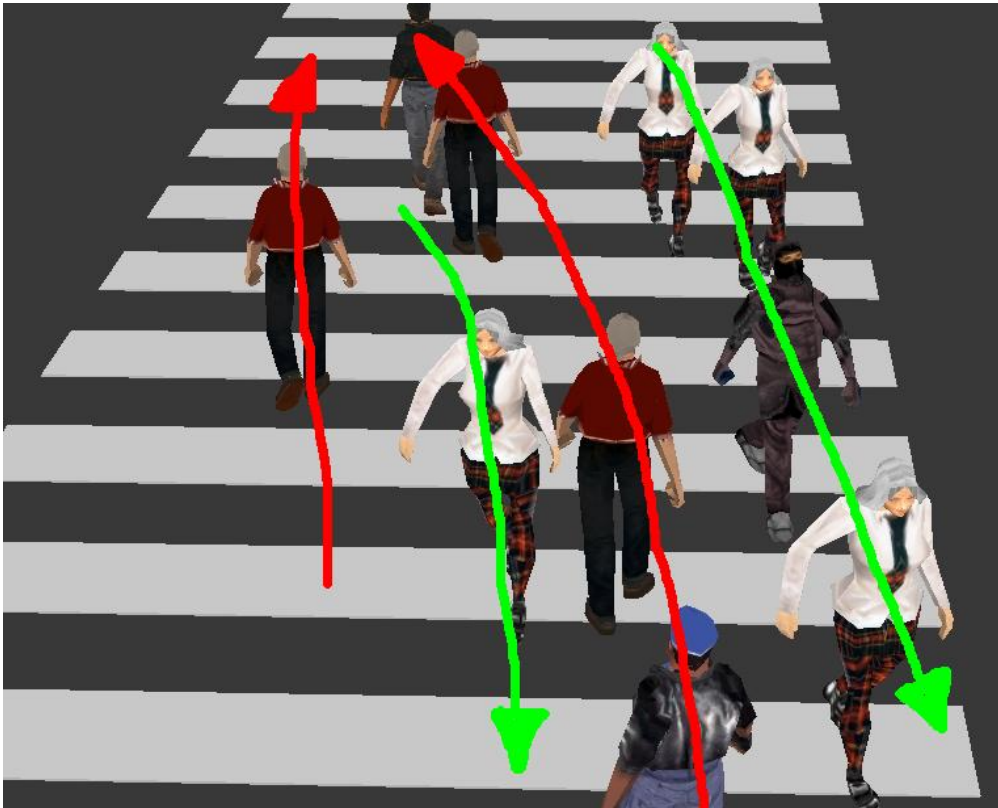


Fig. 31 – Formation de lignes interverties.



Fig. 32 – Agents attendant à un passage piéton.

F-2. ÉVALUATION

Afin d'évaluer la pertinence de certains choix, quelques tests ont été effectués. Le principe était le suivant : deux simulations sont lancées avec les mêmes conditions initiales, mais une des deux est privée de la fonctionnalité que l'on souhaite évaluer. L'impact visuel de l'évitement de collision, du maintien dans les zones appropriées, des stratégies et des déplacements à plusieurs a ainsi été évalué.

F-2.1 ÉVITEMENT DE COLLISIONS

La figure 33 montre des captures d'écran d'une simulation avec ou sans évitement de collision. Durant ce test, deux simulations d'une minute chacune ont été lancées et cinq piétons de chaque simulation, choisis au hasard, ont été suivis et leurs collisions comptabilisées (si deux piétons suivis entrent en contact, la collision n'est comptée qu'une fois). Le tableau 34 montre les résultats obtenus.

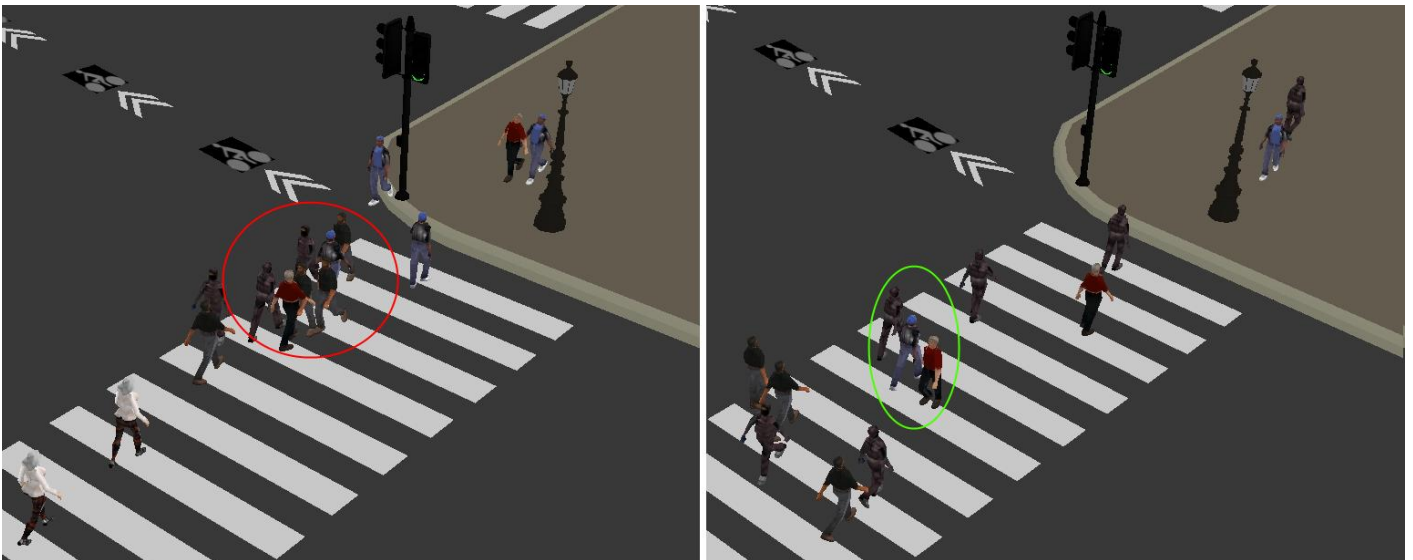


Fig. 33 – À gauche, l'évitement de collision est désactivé, de nombreuses collisions se produisent (cercle rouge). À droite, il est activé, la circulation est plus fluide (cercle vert).

	Piéton 1	Piéton 2	Piéton 3	Piéton 4	Piéton 5	Total
Avec détection	0	0	1	0	1	2
Sans détection	4	4	6	6	5	25

Fig 34 – Nombre de collisions par piéton, sur une durée d'une minute dans une simulation de 40 agents.

F-2.2 MAINTIEN DANS LES ZONES APPROPRIÉES

La figure 35 montre une capture d'écran d'une simulation sans maintien dans les zones appropriées, et une autre avec le maintien. On s'aperçoit que voir trop de piétons marcher sur la route nuit au réalisme de la simulation.

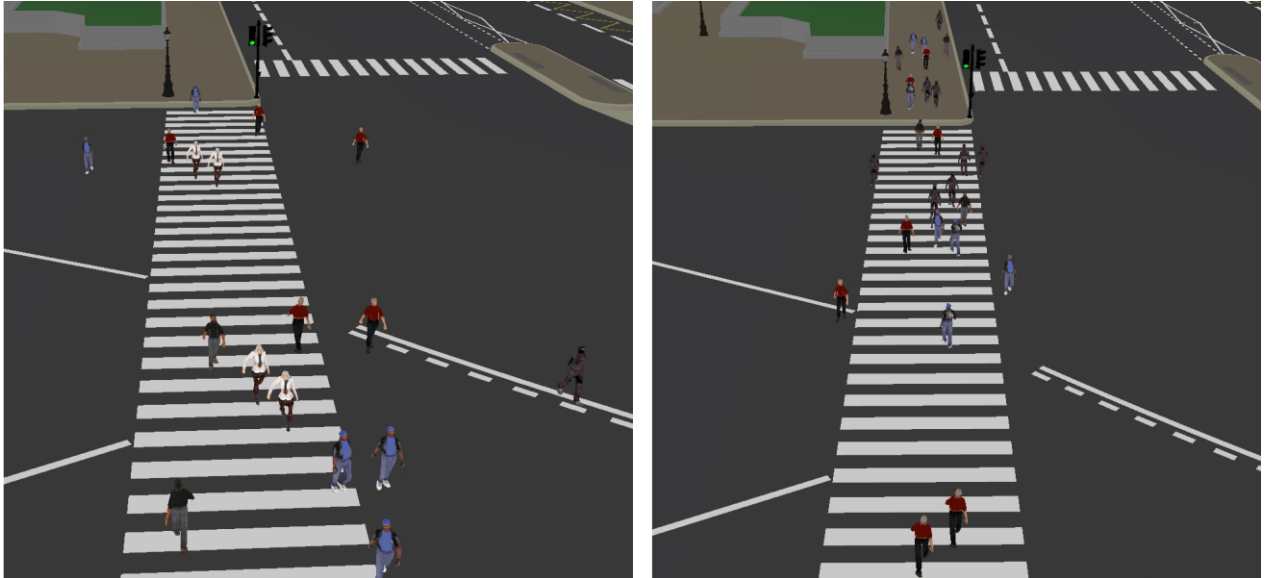


Fig. 35 – À gauche, le maintien dans les zones appropriées est désactivé : beaucoup d'agents marchent sur la route. À droite, seuls les piétons suivant la stratégie rapide débordent..

F-2.3 DÉPLACEMENTS EN GROUPE

La figure 36 montre la différence visuelle entre une simulation sans groupe de piétons et une autre où certains personnages se déplacent à plusieurs.

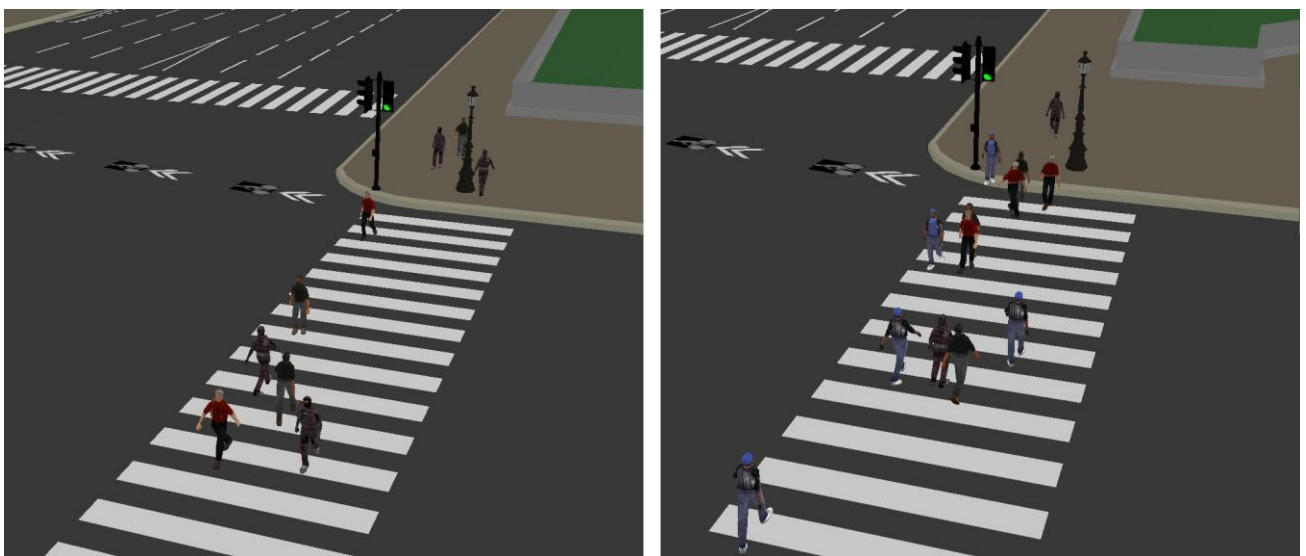


Fig. 36 – La capture d'écran de gauche montre une capture d'écran où tout le monde marche seul, celle de droite, où certains piétons se déplacent en petit groupe, paraît plus naturelle.

F-2.4 STRATÉGIES

Enfin, Les deux séries de captures d'écran de la figure 37 montrent l'évolution de deux foules à partir du même état initial. Dans la première, tous les agents suivent la stratégie classique. Dans la deuxième 80% des agents suivent la stratégie classique, 10% la lente, et 10% la rapide. On s'aperçoit que l'hétérogénéité des stratégies favorise le « mélange » des piétons et fait se rapprocher la simulation de la réalité.

Pour les besoins du test, les piétons ont été colorés selon leur position de départ. On peut voir qu'à droite certains piétons verts passent devant des bleus, et certains bleus dépassent des jaunes, alors qu'à gauche, la foule semble figée. Les différentes stratégies enrichissent la simulation, apportant diversité et singularités (piéton très lent, piéton marchant sur la route).

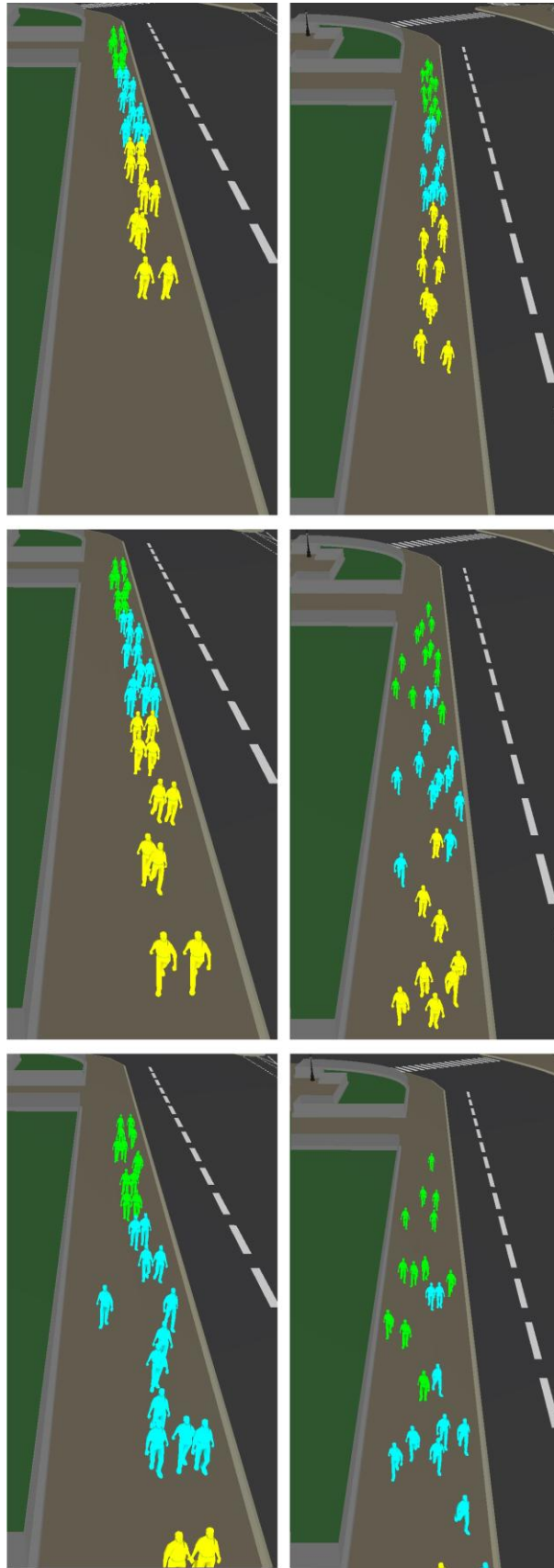


Fig. 37 – La série de gauche montre l'évolution d'une foule où tous les agents suivent la stratégie classique contrairement à celle de droite où tous ne suivent pas la même stratégie.

F-2.5 COMPARAISON RÉALITÉ/SIMULATION

Si l'on se risque à la comparaison avec le réel (fig 38), les résultats sont satisfaisants. On retrouve dans la simulation une certaine diversité de comportements, jusqu'aux « erreurs » de navigation (traversée au mauvais moment par exemple) ainsi que la présence de groupes de deux à 5 personnes. Pour améliorer ce résultat, il faudrait plus d'apparences différentes pour les personnages.



Fig.38 – Une prise de vue réelle à gauche et une scène simulée dans des circonstances similaires à droite

F-3. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS D'UN MOTEUR PHYSIQUE

Bullet Physics dispose d'un module cinématique permettant de contrôler des objets sans que ceux-ci soient soumis à de réelles forces physiques, mais seulement à une pseudo-gravité et au vecteur vitesse défini par l'utilisateur. Bullet gère aussi la détection de collisions ainsi que la réaction à celles-ci : les objets se bloquent ou se soulèvent au lieu de s'interpénétrer. Cette fonctionnalité est le principal point fort de l'utilisation d'un tel moteur puisqu'on n'a pas à le faire à la main.

Cependant cette aide s'accompagne d'inconvénients. La passe de Bullet est la dernière de la simulation. On lui fournit une vitesse et une orientation pour chaque personnage et c'est lui qui s'occupe de les faire bouger tout en vérifiant les collisions. Seulement, il est impossible *a posteriori* ces déplacements, par exemple en ajustant manuellement la nouvelle position des agents. C'est une des difficultés qui entrave actuellement le développement des déplacements à plusieurs.

En résumé, Bullet apporte la locomotion et la détection de collisions mais prive d'une partie du contrôle des piétons.

F-4. PRINCIPALES DIFFICULTÉS

Les difficultés dues au manque de contrôle n'ont pas été les seules à se présenter lors de ce stage.

La technique initialement imaginée consistait à lancer un éventail de rayons d'une longueur limitée parallèles au sol. Le piéton suivait alors le rayon le plus long le plus proche de sa direction désirée. J'ai donc commencé à coder mon propre lancer de rayons, mais la détection des intersections avec les objets gérés par Bullet s'est avérée ardue. En fouillant la documentation de Bullet, j'ai trouvé une fonctionnalité permettant de lancer des rayons, mais là encore la détection de certains objets ne s'effectuait pas correctement. C'est pour cela que j'ai opté pour une méthode équivalente, celle du tableau de directions.

J'ai passé énormément de temps à ajuster les différents paramètres de la simulation, comme l'angle d'ouverture du champ de vision, sa taille, le pas d'anticipation, le poids à accorder à la direction libre par rapport à celle désirée, la fréquence des perceptions, etc. Pour certains, je ne suis pas parvenu à trouver de valeur parfaite. Par exemple Bullet dispose d'une constante définissant la hauteur qu'un piéton peut enjamber, trop faible le piéton n'arrivera pas à monter sur les trottoirs, trop grand le piéton passera par-dessus les murs. Mais la différence entre « trop faible » et « trop grand » est tellement ténue que je n'ai pas trouvé la valeur permettant aux piétons de toujours arriver à monter sur un trottoir sans jamais être « propulsés » inopinément vers le haut lorsqu'ils s'approchent d'autres obstacles statiques comme les murs ou les lampadaires.

Le modèle de la ville virtuelle est en fait un seul objet 3D. Les lampadaires sont par exemple solidaires du sol, des immeubles et de tout le reste. Ce manque de flexibilité a causé quelques problèmes.

Enfin, les dernières difficultés qui m'ont coûté du temps sont liées au groupe de TER qui travaillait sur les interactions avec les piétons. Il devait permettre la sélection et le contrôle des piétons avec la souris et disposait du même code de base que moi. L'installation des nombreuses bibliothèques nécessaires au fonctionnement du projet a été très fastidieuse, puis, les codes ayant évolué différemment, l'intégration de leur travail au mien a été difficile.

Ce chapitre présentait seulement les considérations techniques du travail. La partie suivante fait le bilan du stage d'un point de vue plus personnel et prend du recul quant au travail effectué.

IV. BILAN

A. CONTRIBUTION AU PROJET

A-1. LA PLACE DE MON TRAVAIL

Si on reprend la pyramide de la figure 5, le niveau géométrie est réalisé avec la capture de mouvement, Bullet Physics gère l'étage déplacement (motion), et le niveau perception était déjà en grande partie codé. Mon travail a consisté en la conception et l'implémentation de l'étage comportement (behavior), pour cela, j'ai dû légèrement modifier la perception comme le montre la figure 39. De simples « billes » les passants sont devenus des agents réactifs situés.

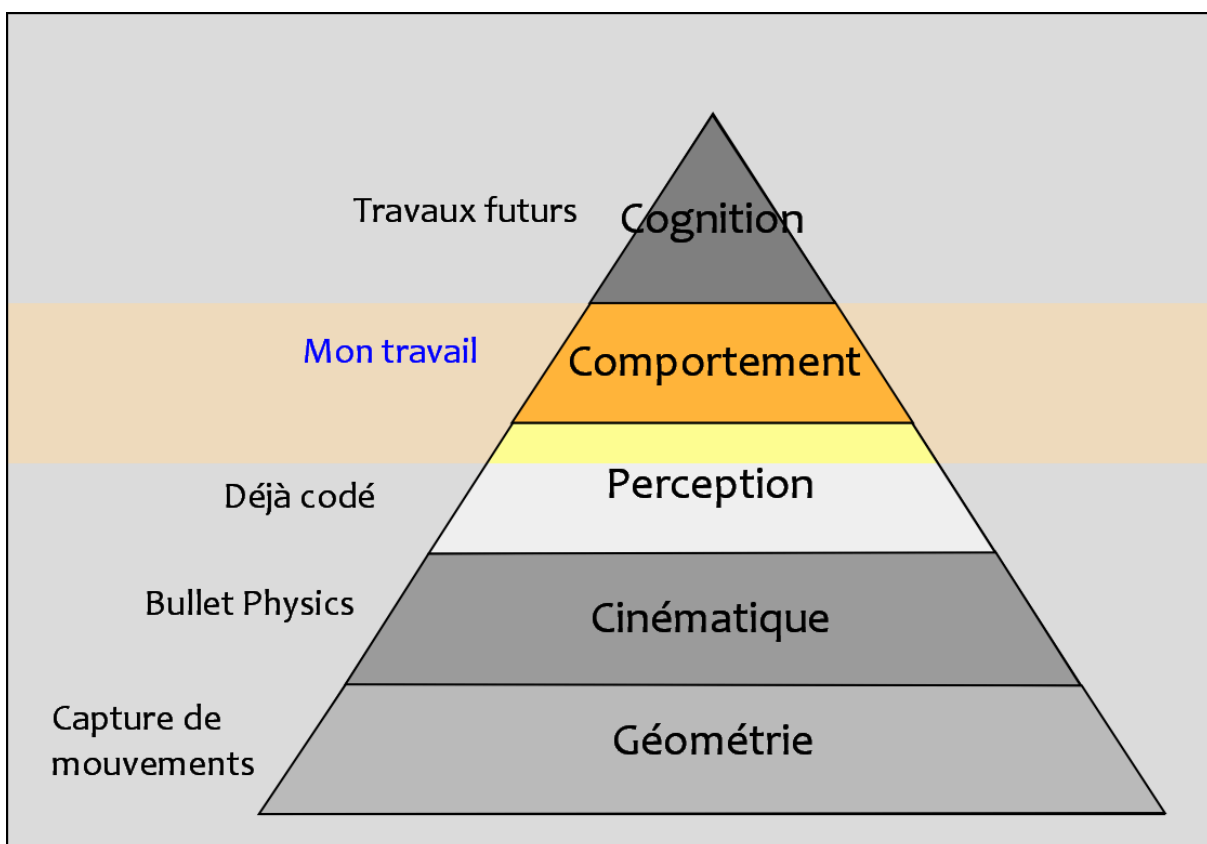


Fig. 39 – La place de mon travail dans la pyramide de modélisation.

Même si j'aurais beaucoup aimé arriver jusque là, aucune fonctionnalité actuelle ne peut selon moi être considérée comme faisant partie de l'étage cognition (bien que le fait de connaître d'autres piétons et d'être capable de former un groupe avec eux s'en rapproche).

Mon travail a apporté les premières pierres d'une simulation de ville virtuelle, mais d'autres doivent être ajoutées.

A-2. PERSPECTIVES

Dans un premier temps, il faut évidemment terminer l'implémentation des groupes (en pensant à respecter leur répartition). Puis, la tâche qui me paraît primordiale est de doter les piétons de plus d'autonomie. Pour l'instant les cibles à atteindre sont définies par l'utilisateur. Il faudrait que chaque agent soit capable de décider lui-même où aller en fonction de ses envies et de ses besoins. Mais pour y parvenir, il faudrait d'abord développer un environnement plus sophistiqué que celui actuellement utilisé (un simple objet 3D balisé). Le nouvel environnement devrait être découpé en plusieurs zones, afin que les agents puissent planifier leur itinéraire, et surtout doté de bâtiments dans lesquels il est possible d'entrer et d'assouvir certains besoins, comme manger dans un restaurant, dormir dans un hôtel, etc. En résumé, il faudrait un environnement avec lequel plus d'interactions sont possibles. Cette autonomie correspondrait à l'étage cognition de la pyramide.

D'autres fonctionnalités pourraient être ajoutées pour se rapprocher d'une ville virtuelle complète : les agents devraient pouvoir se déplacer en voiture, en vélo ou prendre les transports en commun, il devrait y avoir une plus grande diversité parmi les passants (plus d'apparences différentes, des enfants, etc) et enfin des captures de mouvement plus complètes (mouvement de tête, pas de côté, course, attente, etc). Enfin, pouvoir simuler beaucoup plus de passants (des dizaines de milliers) sera une étape inévitable.

B. APPORTS DU STAGE

B-1. VÉCU

Ce stage a été une expérience enrichissante sur plusieurs plans. Tout d'abord, il m'a permis de mettre en application de manière concrète et utile les connaissances et les compétences acquises au cours de mon cursus universitaire, tout en continuant de me perfectionner. J'ai également beaucoup appris sur la vie et le fonctionnement d'un laboratoire et pu expérimenter ce qu'est le monde de la recherche. Je me suis par exemple rendu compte que la difficulté résidait autant dans la complexité des problèmes abordés que dans le fait que les objectifs sont parfois vagues (comme c'était le cas dans mon stage) et qu'on ne sait pas toujours s'ils sont réalisables. J'ai également réalisé à quel point le travail était prenant puisqu'à chacune de mes sorties en ville je ne pouvais m'empêcher de décortiquer la marche et les trajectoires des passants, ainsi que mon propre comportement face à un obstacle.

J'ai bénéficié d'une grande liberté, cela m'a permis d'être autonome et de me fixer mes propres objectifs mais a également été source de difficultés à des moments où j'étais un peu perdu. Mes tuteurs étaient heureusement là pour me guider, mais cela ne m'a pas empêché de faire quelques erreurs. Trop confiant sur le fait de pouvoir poursuivre ce sujet en thèse, j'ai par exemple passé trop de temps sur la recherche bibliographique. Je pensais que cela me serait utile sur le (très) long terme, mais finalement j'ai plus perdu du temps de développement qu'autre chose.

Ce stage m'a également permis de mettre un pied de l'autre côté du miroir de l'enseignement, puisque j'ai activement aidé un groupe de TER. Passer plusieurs après-midis de travail avec eux, participer aux réunions et assister à la soutenance sans être dans la peau de « l'étudiant qui sera noté à la fin » a été une expérience intéressante.

Enfin, les séminaires auxquels j'ai assisté m'ont donné l'occasion de discuter avec des chercheurs et des doctorants, et de me faire une idée plus précise de ce qu'allait être mon avenir.

B-2. AVENIR

J'ai choisi de faire un stage en laboratoire principalement pour deux raisons : confirmer mon attrait pour la recherche et avoir un tremplin vers un doctorat. Même si cela ne s'est pas déroulé exactement comme je l'espérais (n'ayant pas été en mesure de candidater aux bourses de l'école doctorale), je poursuivrai mon cursus universitaire en thèse. Le sujet concerne l'auto-calibration de moteurs à l'aide des systèmes multi-agents adaptatifs. La calibration d'un moteur est une tâche actuellement effectuée à la main qui peut prendre jusqu'à une année dans l'industrie automobile, l'automatiser engendrerait un gain de temps (et donc d'argent) considérable.

Bien que n'ayant aucun lien avec l'image, ce sujet proche de l'intelligence artificielle m'intéresse fortement et me permettra de diversifier mes connaissances. C'est par un concours de circonstances qu'il m'a été proposé à un moment où ma situation me frustrait ; je l'ai accepté après mûre réflexion. Dès le 1^{er} octobre j'intégrerai donc l'équipe SMAC en tant que doctorant.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Allbeck10] J. Allbeck.
Functional Crowds. CASA, 2010.
- [DeSevin06] E. de Sevin.
An Action Selection Architecture for Autonomous Virtual Humans in Persistent Worlds. Thèse, 2006.
- [Durupinar08] F. Durupinar, J. Allbeck, N. Pelechano, N. Badler.
Creating Crowd Variation with the OCEAN Personality Model. AAMAS, 2008.
- [Ennis10] C. Ennis, A. Gerdelan, C. O'Sullivan.
Plausible Methods For Populating Virtual Scenes. CASA, 2010.
- [Ferber95] J. Ferber.
Systèmes Multi-Agents : Vers une intelligence collective. Inter-éditions, 1995.
- [Funge99] J. Funge, X. Tu, D. Terzopoulos
Cognitive Modeling : Knowledge, Reasoning and Planning for Intelligent Characters. International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1999.
- [Heïgeas03] L. Heïgeas, A. Lucianni, J. Thollot, N. Castagné.
A Physically-based Particle Model Of Emergent Crowd Behaviors. International Conference Graphicon, 2003.
- [Helbing95] D. Helbing, P. Molnar.
Social Force Model for Pedestrian Dynamics. Physical Review, 1995.
- [Helbing01] D. Helbing, P. Molnar, I.J Farkas, K. Bolay.
Self-organizing Pedestrian Movement. Environment and Planning B: Planning and Design, 2001.
- [Hu06] X. Hu.
Context Dependent Adaptability in Crowd Behavior Simulation. IEEE International Conference On Information Reuse and Integration, 2006.
- [Hughes03] R.L. Hughes.
The Flow of Human Crowds. Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 35, 2003.
- [Lamarche04] F. Lamarche, S. Donikian.
Crowd of Virtual Humans : A New Approach for Real-Time Navigation in Complex and Structured Environments. Eurographics, 2004.

- [Lerner07] A. Lerner, Y. Chrysanthou, D. Lischinsky.
Crowds by Example. Eurographics, 2007.
- [Milgram69] S. Milgram, H. Toch.
Handbook of Social Psychology, vol. 4. Addison-Wesley, 1969.
- [Moussaïd09] M. Moussaïd, D. Helbing, S. Garnier, A. Johansson, M. Combe, G. Teraulaz.
Experimental Study of the Behavioural Mechanisms Underlying Self-organization in Human Crowds. Proceedings of the Royal Society, 2009
- [Musse01] S.R. Musse, D. Thalmann.
Hierarchical Model for Real-Time Simulation of Virtual Human Crowds. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2001.
- [Narain09] R. Narain, A. Golas, S. Curtis, M. C. Lin.
Aggregate Dynamics for Dense Crowd Simulation. SIGGRAPH, 2009.
- [Paris06] S. Paris, S. Donikian, N. Bonvalet.
Vers une Architecture pour de la Simulation de Foule Microscopique. AFIG, 2006.
- [Paris07] S. Paris, J. Pettré, S. Donikian.
Pedestrian Reactive Navigation for Crowd Simulation : A Predictive Approach. Eurographics, 2007.
- [Pelechano07] N. Pelechano, J.M. Allbeck, N.I. Badler.
Controlling Individual Agents in High-Density Crowd Simulation. SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, 2007.
- [Reynolds99] C. Reynolds.
Steering Behaviors For Autonomous Characters. Game Developers Conference. 1999.
- [Seyfried05] A. Seyfried, B. Steffen, W. Klingsch, M. Boltes.
The Fundamental Diagram of Pedestrian Movement Revisited. Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment, 2005.
- [Shao05a] W. Shao, D. Terzopoulos.
Environmental Modeling for Autonomous Virtual Pedestrians. SAE Symposium on Digital Human Modeling for Design and Engineering, 2005.
- [Shao05b] W. Shao, D. Terzopoulos.
Autonomous Pedestrians. Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, 2005.
- [Shao06] W. Shao.
Animating Autonomous Pedestrians. Thèse, 2006.

- [Terzopoulos94] D. Terzopoulos, X. Tu, R. Grzeszczuk.
Artificial Fishes : Physics, Locomotion, Perception, Behavior. SIGGRAPH, 1994.
- [Tom07] A. Tom, J-M. Auberlet, R. Brémond.
Approche psychologique de l'activité de traversée de piétons au carrefour. Comportement du piéton dans son environnement, colloque francophone international, 2007.
- [Treuille06] A. Treuille, S. Cooper, Z. Popovic.
Continuum Crowds. SIGGRAPH, 2006.
- [Weidmann93] U. Weidmann.
Transporttechnik der Fußgänger. IVT N°90 deuxième édition étendue, 1993.
- [Wiggins96] J.S. Wiggins.
The Five-Factors Model of Personality : Theoretical Perspectives. Livre, 1996.
- [Wooldridge02] M. Wooldrige.
An Introduction to Multi-Agent Systems. John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [Yersin09] B. Yersin, J. Maïm, J. Pettré, D. Thalmann.
Crowd Patches : Populating Large-Scale Virtual Environments for Real-Time Applications. Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, 2009.

ANNEXES

Documentation s'adressant en particulier aux personnes amenées à travailler sur ce projet après moi.

Annexe I : Créer et manipuler un piéton

Annexe II : Format des fichiers texte