

# Adaptation dynamique du comportement : vers un modèle guidé par la perception

L.Bourgeois<sup>1</sup> H. Rabai<sup>1,2</sup> J.-M. Auberlet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Paris-Est  
IFSTTAR-IM-LEPSIS  
53 boulevard Lefebvre  
75732 Paris, CEDEX 15  
laure.bourgeois@ifsttar.fr  
jean-michel.auberlet@ifsttar.fr

<sup>2</sup>Lamsade (UMR 7024),  
Université Paris-Dauphine,  
Place du Maréchal de Lattre de Tassigny  
75775 Paris Cedex 16, France  
rabai.haifa@gmail.com

## Résumé

La plupart des travaux portant sur la simulation de piétons les placent dans un contexte d'interaction inter piéton quasi homogène (situation de panique, traversée de rue, atteinte de cible). Ils ne prennent pas en compte les multiples interactions inter-piétons induites par un environnement dynamique et nécessitant une adaptation contextuelle, par exemple une situation de danger perçue. En effet, pour s'écarter d'un piéton dangereux, les piétons vont accepter de se rapprocher les uns des autres. De ce fait, ils modifient l'interaction initiale qu'ils avaient les uns avec les autres (les piétons dits « normaux ») en fonction de leur perception de l'environnement. Étant donné un modèle de déplacement, notre proposition vise à poser les bases d'un modèle agent piéton dans le but de pouvoir prendre compte les aspects contextuels et dynamiques des interactions entre piétons.

## Mots Clef

Piéton, Simulation, Perception, Contexte, Interaction dynamique.

## Abstract

Most works on pedestrian simulations place them in a homogeneous context (panic situation, crossing streets, following target). They do not take into account the many inter-pedestrian interactions induced by a dynamical environment requiring a contextual adaptation, for instance a situation with a danger perceived. Indeed, to deviate from a dangerous pedestrian, one will accept to get closer to other "normal" pedestrians. Thus, one alters the initial interaction based on his perception of the environment. Based on a moving model, we propose to found an agent pedestrian model that can undertake the contextual and dynamic aspect of interactions between pedestrians.

## Keywords

Pedestrian, Simulation, Perception, Context, Dynamical Interaction.

## 1 Introduction

La plupart des travaux portant sur les simulations piétons les présentent dans des situations d'interactions homogènes comme les déplacements dans une gare, les évacuations d'urgence, la traversée de rue. Il s'agit d'étudier les modèles pouvant simuler au mieux des comportements moyens de piétons. La majorité des outils disponibles aujourd'hui s'appuient sur des méthodes relevant des statistiques et de l'automatique. L'hétérogénéité des comportements piétons est alors traduite par l'utilisation de paramètres (vitesse libre, âge, genre, taille...) qui suivent des lois de probabilité. Il s'agit alors de simuler des distributions de comportements moyens. Cependant, lorsque la simulation est au niveau microscopique (individualisation des piétons), des différences apparaissent entre les comportements simulés et les comportements réels observés. Cette approche statistique devient alors insuffisante pour modéliser et simuler des comportements complexes de piétons dans leur déplacement en cas de situations dynamiques.

Pourtant, il n'y a pas ou peu de travaux en informatique portant spécifiquement sur la modélisation du comportement du piéton en cas de modification dynamique du contexte environnemental, par exemple la perception d'un danger immédiat.

De manière pratique, l'observation des foules de piétons montre que ces derniers peuvent avoir des comportements collectifs totalement inadaptés, ce qui peut avoir des conséquences dramatiques [21].

Nous proposons ici une approche Agent Centrée avec une architecture hiérarchique *dirigée par les perceptions* et articulée à l'aide d'un automate qui permet de s'adapter

aux diverses situations d'interaction. Le modèle est donc extensible et a comme souci la généralité.

La section 2 donne un état de l'art des simulations microscopiques piéton. La section 3 présente le modèle de déplacement initial fondé sur des travaux antérieurs. La section 4 présente un automate permettant de contrôler le déplacement du piéton en fonction de la perception de la situation courante. Cette section comprend une description du modèle utilisé et de la réaction du piéton face à un piéton représentant un danger (en présence d'autres piétons non dangereux). La section 5 présente nos simulations et nos résultats. Enfin la section 6 propose les perspectives envisagées de nos travaux.

## 2 Etat de l'art

En terme de modélisation des déplacements piétons, nous recensons uniquement les modèles microscopiques représentant les piétons par des entités/particules individuelles ou des modèles pouvant s'appliquer à des piétons à ce niveau de granularité. Parmi les nombreux modèles, on peut citer entre autres deux approches (avec une représentation discrétisée ou continue) : ceux fondés sur une approche physique (piéton soumis à des forces) et ceux fondés sur des règles comportementales.

Parmi les modèles de cette première approche, on peut citer le Social Force Model (SFM) de Helbing *et al.* [10], un modèle de simulation de foule. Il décrit un piéton comme une particule soumise à des forces attractives (sa destination, certains piétons) et des forces répulsives (murs, piétons). Ce modèle est très largement utilisé en raison de sa simplicité et son extensibilité, chaque auteur apportant une calibration différente en fonction des situations à simuler [24]. Cependant, le SFM présente plusieurs limites, entre autres : c'est un modèle essentiellement réactif, il n'y a pas de gestion simultanée des interactions de nature différente.

Le modèle de Teknomo [25] est un modèle utilisant la notion de force sociale s'appliquant sur les piétons pour déterminer leur nouvelle position. La différence avec le modèle SFM de Helbing que nous présenterons en détail dans la section suivante, vient principalement de la formulation sous forme d'une équation différentielle du second ordre. Teknomo ajoute un terme pour gérer les collisions mais ne tient pas compte du caractère des autres piétons.

Pour modéliser les piétons, Hoogendoorn reprend les concepts de la théorie du contrôle [11][12]. Le piéton optimise une fonction d'utilité avec un ensemble de coûts différents pour l'accélération, la proximité d'autrui et la déviation de la trajectoire optimale.

Similairement à Alen [1] pour la tâche de conduite, Hoogendoorn [11] propose une architecture conceptuelle du piéton comprenant trois niveaux :

- stratégique : les décisions à long terme (planification d'itinéraire),

- tactique : les décisions à moyen terme (activités de choix de morceau d'itinéraire, type d'interaction),
- opérationnel : les mouvements physiques instantanés influencés par l'environnement.

Hoogendoorn préconise une collaboration entre ces niveaux. Cependant, il n'en donne ni de formalisation, ni de description précise.

Blue et Adler dans [3] présentent un modèle utilisant un automate cellulaire. L'espace est représenté par une grille à deux dimensions et le piéton se déplace en sautant d'une cellule à une autre. Dans cette approche, la perception est uniforme et discrète et ne prend pas en compte les différents caractères des autres piétons.

Par ailleurs, pour les modèles comportementaux, nous pouvons citer le modèle de Reynolds qui modélise des bancs de poissons ou des nuées d'oiseaux par des agents et propose le modèle des bovids pour résoudre la problématique des déplacements [23]. Ce modèle permet de simuler le comportement cohérent de groupes (de poisson, d'oiseaux...) qui émerge des actions et des interactions de l'ensemble des agents.

CROWD-MAGS project [19], bien que s'appuyant sur une représentation individualisée des piétons, est un outil pour la modélisation et la simulation du contrôle des foules. Son objectif est d'étendre les modèles existants sur les foules avec des notions sociales explicites. Un agent piéton reconnaît qu'il appartient à un groupe et en déduit une série d'actions. Techniquement, chaque agent possède un ensemble de comportements complexes modélisés par un ensemble de règles hiérarchiques. La décision d'un agent de faire partie d'un groupe ou de le quitter dépend en partie de son appréciation de l'agressivité [19]. C'est un processus cognitif qui détermine l'adhésion au groupe, cela ne traite pas le cas d'une foule d'anonymes avec des interactions de plus bas niveau (évitement, regroupement). De récents travaux [20] prennent en compte les forces attractives entre piétons dans le but de reproduire les motifs récurrents observés lors de la formation de groupes de piétons et leur influence sur l'écoulement de la foule. Ces recherches supposent que les piétons étudiés forment *a priori* des groupes *conscients* (groupes d'amis, de promeneurs, de consommateurs). Ici, nous voulons simuler une foule d'anonyme se déplaçant dans un couloir et à plus long terme dans une ville.

Nos travaux cependant s'inscrivent dans la coordination d'agent même si ici il n'y a pas de communication explicite entre eux [2][6][8].

Nous allons à présent détailler l'architecture agent que nous proposons.

### 3 Architecture hiérarchique

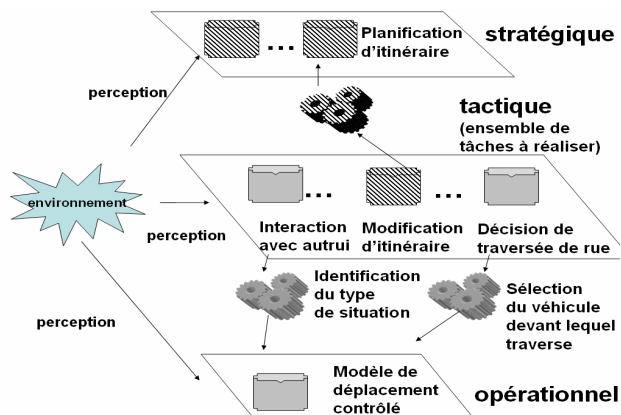


Fig 1. Architecture hiérarchique avec interaction entre niveaux

Nous utilisons le cadre conceptuel de Weyns [27] : avec un cycle perception-interprétation-sélection-décision. Nous remarquons que les processus interprétation et sélection peuvent être découplés et qu'il existe une boucle de rétro action ou la décision a un rôle majeur [15].

La figure 1 présente une architecture hiérarchique « perception centrée » d'un agent se déplaçant dans un contexte urbain. Si comme attendu, les percepts influencent les actions du piéton, l'originalité réside dans l'utilisation de l'interprétation des percepts. Cette architecture peut être vue comme une architecture hybride [17]. Elle est dirigée par un ensemble de tâches (niveau stratégique) et de « sous-tâches » à effectuer (niveau tactique). Il y a des interactions entre niveaux selon les différentes tâches. Nous nous focalisons sur les interactions entre niveau tactique et opérationnel en particulier pour la tâche d'interaction à autrui. Le niveau opérationnel (déplacement) est peut alors être contrôlé de différentes manières selon la nature tâche à effectuer (traverser une rue, s'écarter d'un danger, se rapprocher ...).

#### 3.1 Modèle de déplacement (niveau opérationnel)

Le déplacement proprement dit du piéton, décrit dans [4], est fondé sur la dernière version du SFM [14]. Ce modèle place le piéton au niveau opérationnel d'Hoogendoorn [11]. Dans ce modèle, le piéton essaie de cheminer en ligne droite pour atteindre sa destination suivant un itinéraire du plus court chemin, tout en évitant les obstacles. Pour cela, les auteurs interprètent la notion de sphère privée comme la somme d'un « champ répulsif subi » calculé en fonction des obstacles de l'environnement et d'un champ attractif fonction lui aussi de la vitesse désirée et de la destination du piéton (et d'éventuels piétons « attirants » pour former des groupes [20]).

Cependant, ce n'est qu'au dernier moment que les piétons évitent les obstacles car le SFM est avant tout un modèle réactif. Nous avons relevé un certain nombre de défauts (champ de vision illimité du piéton, possibles retours en arrière) que nous avons corrigé dans [4].

Par ailleurs, le refus (variant selon les cultures) de la promiscuité délimite la sphère privée du piéton, et donc l'intensité de la réaction aux stimuli est variable selon les cultures et plus généralement les situations. Nous remarquons aussi que Helbing dans un souci de calibration a donné la même valeur pour tous les piétons aux paramètres.

Reprenant les valeurs de ces paramètres, nous avons amélioré la perception passive dans le SFM dans [4] par des mesures de sensibilité permettant de fixer certains paramètres (la profondeur du champ perceptif est de 9m pour tous les piétons). Nos précédents travaux [4] ont permis de tester la sensibilité de la perception (paramètre lambda) dans une situation « normale » (i.e. sans danger) et non évolutive. De plus, nous avons enrichi le modèle par une fonction de prédiction, assimilée une fonction d'anticipation, qui permet au piéton de subir de la part de ses voisins, moins de forces et moins longtemps.

Nous remarquons que le modèle de Helbing définit la même interaction entre les piétons sans prendre en compte leur caractéristique ou la volonté des piétons d'être plus près ou plus loin des autres piétons.

Il faut donc enrichir ce modèle en passant à un autre niveau de granularité conceptuelle avec un modèle permettant le contrôle, en fonction du contexte, des réactions aux stimuli extérieurs.

Formellement un agent piéton est défini par :

$$\alpha = (c_{\alpha}^t, df_{\alpha}, v_{\alpha}^0, A_{\alpha}, B_{\alpha}, \lambda_{\alpha})$$

avec :  $c_{\alpha}^t$  les coordonnées géométrique du piéton au temps  $t$ ,  $df_{\alpha}$  celles de sa destination finale ou locale,  $v_{\alpha}^0$  sa vitesse désirée,  $A_{\alpha}$  l'intensité de sa réaction au stimuli,  $B_{\alpha}$  le seuil à partir duquel le piéton n'est plus sensible aux autres éléments/agents et  $\lambda_{\alpha}$  le paramètre de la sensibilité de son champ de vision.

Les sous sections suivantes détaillent la perception du piéton et le processus permettant de faire avancer le piéton selon sa perception.

##### 3.1.1 Perception des autres piétons

L'influence d'un agent piéton  $\beta$  dans le champ de vision de l'agent piéton  $\alpha$ , est fonction de la position de  $\beta$ , du paramètre de sensibilité  $\lambda_{\alpha}$  (compris entre 0 et 1) et de l'angle  $\phi_{\alpha\beta}$  selon lequel  $\alpha$  perçoit  $\beta$  :

$$w(\phi_{\alpha\beta}) = \lambda_{\alpha} + (1 - \lambda_{\alpha}) \frac{1 - \cos(\phi_{\alpha\beta})}{2} \quad (1)$$

En fonction de la valeur prise par  $\lambda_\alpha$ , la sensibilité de la perception du piéton est plus ou moins uniforme sur  $360^\circ$  et les piétons derrière  $\alpha$  peuvent ainsi avoir une influence variable sur son accélération et donc sur sa vitesse. Un piéton  $\alpha$  a donc une sensibilité anisotrope, qui est fonction de la direction de son déplacement et de  $\lambda_\alpha$ .

Nous reprenons ici l'hypothèse de Helbing : la sensibilité du champ de vision est identique pour tous les piétons.

### 3.1.2 Déplacements selon le modèle SFM

Chaque agent piéton  $\alpha$  a une vitesse désirée  $v_\alpha^0$  et essaye de cheminer dans une direction (voulue)  $\vec{e}_\alpha$  qui dépend de la position du piéton  $c_\alpha^t$  et de sa destination. Il essaie ainsi de maintenir plus ou moins agressivement (selon le paramètre  $\tau_\alpha$ ) sa vitesse actuelle  $\vec{v}_\alpha^t$  à sa vitesse désirée tout en conservant sa direction souhaitée  $\vec{v}_\alpha^t = v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha$ . L'accélération de l'agent est ainsi définie par l'équation suivante :

$$\vec{\gamma}_\alpha = \frac{1}{\tau_\alpha} (v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha - \vec{v}_\alpha^t) + \sum_{\beta(\neq\alpha)} \vec{f}_{\alpha\beta} + \sum_{obst} \vec{f}_{\alpha obst} \quad (2)$$

Les termes  $\vec{f}_{\alpha\beta}$  et  $\vec{f}_{\alpha obst}$  représentent les forces répulsives pour que le piéton  $\alpha$  tente d'éviter respectivement les autres piétons  $\beta$  et les obstacles fixes *obst* (murs, mobilier urbain) et donc de minimiser la promiscuité à ces obstacles, tentant ainsi d'exhiber la notion de sphère privée. La force  $\vec{f}_{\alpha\beta}$  est exprimée en fonction de  $w(\phi_{\alpha\beta})$  et de  $d_{\alpha\beta}$ , la distance qui sépare les piétons  $\alpha$  et  $\beta$ .

$$\vec{f}_{\alpha\beta} = w(\phi_{\alpha\beta}) A_\alpha e^{\frac{R_\alpha + R_\beta - d_{\alpha\beta}}{B_\alpha}} \hat{d}_{\alpha\beta} \quad (3)$$

$R_\alpha$  et  $R_\beta$  représentent respectivement le rayon des piétons  $\alpha$  et  $\beta$ .  $\hat{d}_{\alpha\beta}$  est le vecteur normalisé de  $\beta$  vers  $\alpha$ . C'est ce vecteur qui détermine la direction de la force exercée par  $\beta$  sur  $\alpha$ . Quand la distance qui sépare les piétons augmente, l'intensité de leurs forces respectives diminue.

Les paramètres permettant de contrôler l'interaction et donc le déplacement sont A et B. Comme nous avons introduit dans [4] la notion de profondeur du champ de vision, nous supposons, comme Helbing, B identique pour tous les piétons.

## 4 Automate pour contrôler le modèle de déplacement

De manière générale, il existe des travaux [13] pour concevoir de systèmes réactifs adaptatifs en utilisant des automates. De plus, Lamarche [16], note que les systèmes d'automates permettent de prendre en compte les changements immédiats de l'environnement (niveau opérationnel) tout en offrant un mécanisme pour prendre des décisions à moyen terme (niveau tactique). Ce formalisme offre une sémantique claire et en terme de modélisation [9] de larges possibilités d'enrichissement. Un automate permet en plus de gérer la cohérence temporelle dans l'enchaînement des actions ce que ne permet pas un simple ensemble de règles [16][18]. Nous avons formalisé notre modèle à l'aide d'un automate pour pouvoir à terme synchroniser des automates entre eux : par exemple pour modéliser la traversée de rue de groupes de piétons. Enfin, ce formalisme a des propriétés très utiles pour vérifier l'existence de « deadlocks » (model-checking).

Nous prenons comme exemple une situation d'évitement prononcée (s'écarter d'un danger) et d'évitement très modéré (se rapprocher d'autrui). Nous formalisons ici une partie de l'interaction entre le niveau tactique (décision d'évitement d'un danger ou de se rapprocher) et le niveau opérationnel (moteur de déplacement). Pour cela, nous présentons un automate permettant de contrôler le déplacement du piéton en fonction de la perception qu'il a de la situation courante.

### 4.1 Automate dirigé par la perception

Le modèle d'interaction entre les niveaux tactique et opérationnel est formalisé par un automate fini présenté figure 1 qui permet d'articuler déplacement et décision. Chaque état de l'automate représente l'état interne de l'agent piéton. L'ensemble des états comprend exhaustivement :

- chaque booléen présenté dans le tableau 1,
- la conjonction des booléens **Danger** et **Normal**.

Les arcs de transitions sont étiquetés par les perceptions présentées dans le tableau 2.

TAB. 1 – Les booléens et leur sémantique

booléen	sémantique
<b>Neutre</b>	modèle SFM sans interaction piéton
<b>Normal</b>	Modèle SFM avec interaction aux piétons
<b>Danger</b>	Modèle SFM avec réaction accrue aux piétons dangereux

Tab. 2 – Les perceptions et leur sémantique

Perception	sémantique
<b>P vide</b>	Le piéton ne perçoit aucun piéton
<b>P n</b>	Le piéton perçoit au moins un piéton « normal »
<b>Pdg</b>	Le piéton perçoit au moins un piéton « dangereux »

L'état **Danger et Normal** représente la situation dans laquelle l'agent piéton perçoit un ou plusieurs agents piétons « normaux » et un ou plusieurs agents piétons « dangereux ». Cet état est le résultat de la conjonction des transitions **Pn** et **Pdg**.

Formellement, c'est un quintuplet  $(Q, V, P, E, T)$  avec  $Q = \{q0, q1, q2, q3\}$  l'ensemble des états,  $V = \{Neutre, Normal, Danger\}$  l'ensemble de variables booléennes,  $P : Q \rightarrow \wp(V)$ , la fonction étiquetant les états de l'automate avec des variables,  $E = \{Pvide, Pn, Pdg\}$ , l'ensemble des transitions et  $T : Q \times E \rightarrow Q$  la fonction d'assignation de transition entre états.

En fonction de son état interne, l'agent piéton modifie un ou plusieurs paramètres du modèle moteur et modifie ses interactions, comme cela est figuré dans le tableau 1.

Nous allons maintenant détailler la réalisation de la modification du modèle de déplacement (nécessitée par les états **Danger**, **Danger et Normal**).

## 4.2 S'écarter du danger

A la perception des piétons dits « dangereux », l'agent piéton désire garder une plus grande distance entre lui et le danger que sa distance de confort usuelle. Pour exprimer cette volonté de s'écarter, nous avons supposé qu'il faut augmenter l'intensité de la réaction des piétons aux stimuli (paramètre A). De ce fait, tous les piétons « normaux » percevant des piétons « dangereux » essaient de s'écarter du danger tout en subissant les forces répulsives des autres piétons « normaux ».

Comme la somme des force répulsive subie par chaque piéton s'accroît, la vitesse moyenne de chaque piéton diminue ce qui va amener une congestion ou du moins un ralentissement du flux. Cependant, Donikian dans [7] note que « Dans les situations de panique, les piétons souhaitent se déplacer beaucoup plus vite que d'habitude et de ce fait vont jusqu'au contact physique avec les autres. » Ce qui nous conduit à une deuxième approche: celle de réduire la distance de confort entre les piétons normaux dans une situation de danger perçu.

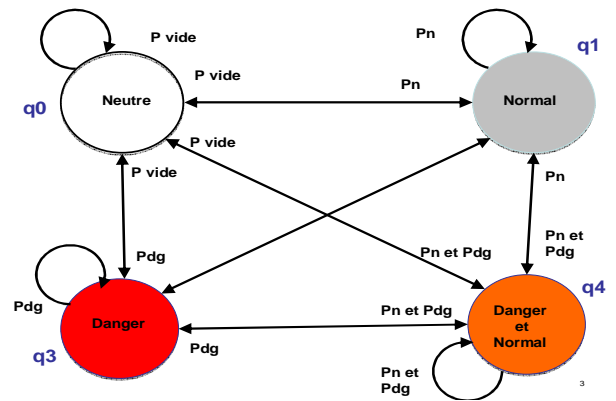


Fig 2. Automate représentant l'état interne du piéton en fonction de ses perceptions<sup>1</sup>.

## 4.3 Se rapprocher des autres piétons non dangereux

Pour éviter les congestions, nous proposons que les piétons « normaux » avec l'état **Danger et Normal**, acceptent d'être plus proches les uns des autres. Pour cela, l'intensité de la réaction aux stimuli émis par les piétons « normaux » décroît (diminuant ainsi les forces répulsives associées). La figure 2 illustre un exemple dans lequel un piéton *égo* perçoit *p1* et *p2* « normaux » et un autre piéton « dangereux ». L'agent diminue l'intensité de sa réaction à *p1* et *p2* et augmente celle par rapport au piéton dangereux, tandis que le piéton *p3* ne percevant que *p1* et *p2* garde une interaction constante avec ces derniers.

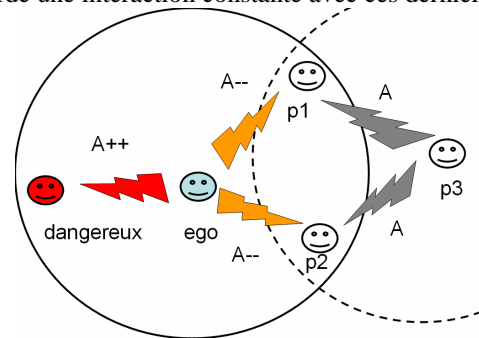


Fig.3. Interactions complexes entre piétons.

## 5 Résultats

Afin de calibrer le paramètre A, l'intensité de la réaction aux stimuli, nous avons simulé des piétons dans différentes situations dynamiques.

Dans nos simulations, l'environnement est représenté par un espace continu, déterministe, (sans stochasticité), dynamique (contenant des agents dynamiques) et

<sup>1</sup> Par souci de lisibilité, les flèches à double sens figurent deux flèches représentant chacune une transition (l'étiquetage se situant à proximité de la flèche).

accessible (toutes les parties de l'espace sont accessibles sauf s'il y a un obstacle). Il est modélisé par un couloir bidirectionnel qui mesure 60 mètres de longueur et 10 mètres de largeur. Les bords de ce couloir constituent un obstacle pour les agents simulés. Les piétons ont des origines et des destinations dans le couloir qui varient selon les besoins des expériences.

### 5.1 Calibration de A pour s'écarter

Nous avons simulé dans un couloir un flux monodirectionnel de 250 piétons « normaux » générés selon une loi de Poisson sur une demi heure. Nous avons placé un piéton « dangereux » immobile au centre du couloir. Nous avons défini arbitrairement une zone d'observation qui mesure 5 mètres de longueur et 5 mètres de largeur autour de ce piéton dangereux pour observer le comportement des autres piétons en terme de vitesse pratiquée et de densité.

Nous avons fait plusieurs simulations avec différentes valeurs de A (avec  $A_{ref}$  la valeur initialement calibrée par Helbing) qui sont  $A_{ref} * 5$ ,  $A_{ref} * 3$  et  $A_{ref} * 2$ . Nous avons constaté que pour des valeurs élevées, les piétons ralentissaient de façon démesurée (pour  $A_{ref} * 5$  et  $A_{ref} * 3$ , la vitesse moyenne chute respectivement de 42% et de 38%) et donc qu'il y avait un risque de congestion. Pour  $A_{ref} * 2$  la vitesse moyenne chute de 9% alors que la densité baisse relativement (de 5% pour  $A_{ref} * 2$  et de 7% pour  $A_{ref} * 3$ ).

Par conséquent, nous avons calibré A avec  $A_{ref} * 2$ , une valeur qui permet à la fois d'éviter au mieux la congestion et qui a néanmoins un impact sur la distance entre les piétons et le piéton dangereux (et donc sur la densité de piéton autour du piéton dangereux).

La figure 3 présente les moyennes des vitesses instantanées des piétons à chaque pas de simulation pour  $A_{ref}$  et  $A_{ref} * 2$ . Cette figure permet de constater que lorsqu'on accroît la réaction des piétons face à un piéton « dangereux », leur vitesse diminue.

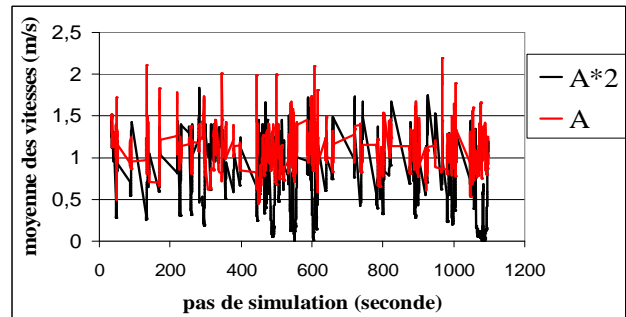


Fig. 5. Moyennes des vitesses pour un flux monodirectionnel en fonction de la valeur de A.

### 5.2 Calibration de A pour se rapprocher

Pour mettre en évidence le rapprochement entre les piétons en fonction de la valeur de A, nous avons simulé trois piétons que nous avons placés sous forme d'un triangle. Chaque piéton simulé devait cheminer en ligne droite pour atteindre sa position d'arrivée en évitant les deux autres piétons. Nous avons enregistré les traces de ces piétons pour deux valeurs différentes de A respectivement :  $A_{ref}$ ,  $A_{ref} / 10$ .

Nous avons constaté pour  $A_{ref} / 10$ , les piétons simulés s'évitaient tout en gardant une distance entre eux plus petite comparée à celles observées pour les autres cas. La figure 6 présente les traces enregistrées pour les trois piétons avec  $A_{ref} / 10$ . Nous observons que les piétons arrivent à destination tout en acceptant d'être plus proches les uns des autres.

Si les piétons acceptent de se rapprocher, ils peuvent aussi se gêner mutuellement dans leur déplacement, nous devons donc nous assurer que le flux global n'est pas ralenti par la calibration.

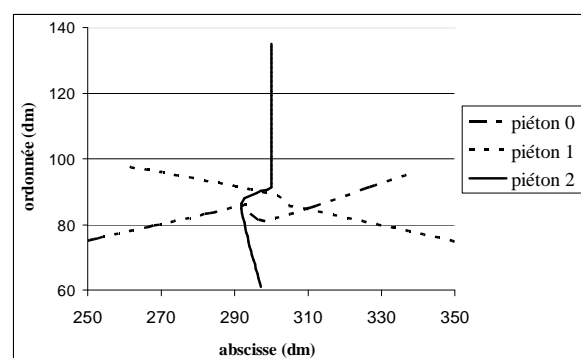


Fig 6. Traces de trois piétons avec  $A_{ref}/10$

Nous avons repris dans notre expérimentation les paramètres définis par Ondřej [22] (tous les piétons ont une vitesse désirée de 1,5 m/s et leur vitesse maximale est de 2 m/s).

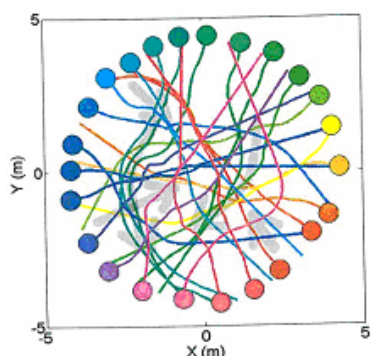


Fig. 7. Trace de simulation de 24 piétons d'après Ondřej [20].

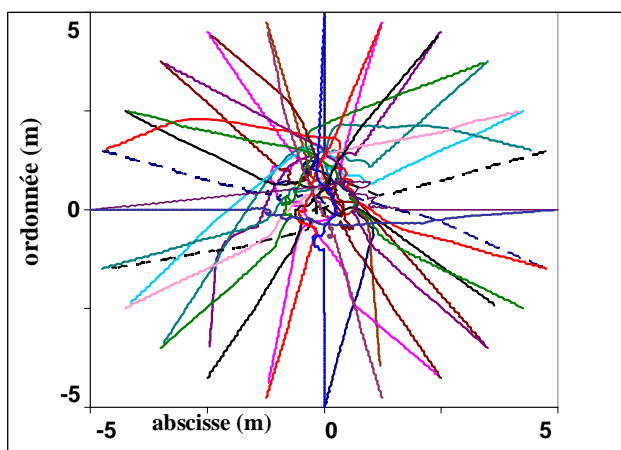


Fig. 8. Trace de simulation de 24 piétons.

Les figures 7 et 8 ci-dessus présentent respectivement les traces des piétons simulés par Ondřej [22] et celles de nos simulations.

Nous pouvons voir que nos piétons simulés acceptent de passer plus près les uns des autres que ceux de Ondřej. De plus, nous avons enregistré aussi la proportion des piétons qui ont une vitesse inférieure à 0,5 m/s et le maximum de temps de parcours. Ondřej a respectivement comme résultat 0,97% et 53s. Nous avons obtenu un pourcentage égal à 0,42% et 39,15s ce qui signifie que nous avons une proportion moindre de piétons allant lentement, donc de piétons *gênés par les autres piétons*. Enfin, visuellement, nous pouvons voir que les itinéraires pris sont plus courts.

### 5.3 Vers une émergence de groupe

Nous avons simulé dans un couloir un flux monodirectionnel de 100 piétons sur une demi heure selon une loi de Poisson. Nous avons aussi simulés 5 piétons « dangereux » mobiles allant dans la même direction que les piétons « normaux ». La figure 9 présente deux copies d'écran de la même simulation avec ou sans piéton dangereux. Un piéton dangereux y est représenté par une étoile.

Chaque piéton réagit individuellement au danger mais au final, nous observons, visuellement à ce stade de nos

travaux, une émergence de groupe que nous qualifions comme un résultat d'un ensemble de comportements individuels.

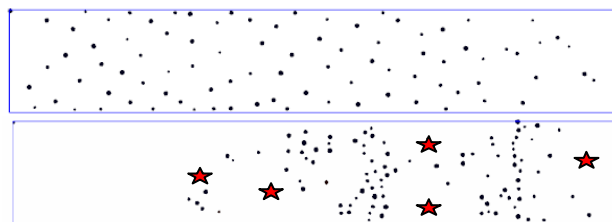


Fig 9. Flux de piétons monodirectionnel (partie supérieure sans piétons dangereux, partie inférieure avec piétons dangereux).

## 6 Conclusion et perspectives

Nous avons présenté un modèle piéton prenant en compte les aspects contextuels et dynamiques des interactions entre piétons. Ce modèle est articulé en utilisant le formalisme extensible et lisible d'un automate fini et permet l'interaction des niveaux tactique et opérationnel selon l'architecture conceptuelle d'Hoogendoorn. En fonction de son état interne issu de ses perceptions, l'agent modifie l'intensité de sa réaction aux stimuli et surcharge le SFM qui implante le moteur de déplacement. Nous avons fait un ensemble de simulations pour calibrer les différentes réactions dans les situations (sans danger, avec danger, avec danger et en présence d'autres piétons). Enfin, nous avons comparé nos résultats à ceux d'Ondřej [22] principalement par rapport à la proportion de piétons lents.

Pour autant, l'absence de benchmarks rend difficile la comparaison (numérique ...) avec d'autres modèles. Néanmoins, nous avons étudié le coût de la perception (au sens « sensing ») en temps de calcul [5].

Une des perspectives de nos travaux est de pouvoir combiner la tâche de traversée de rue en présence d'un danger immédiat, il faudra alors composer les automates correspondant à chaque tâche afin de garantir une cohérence temporelle et une cohérence interne.

Nous envisageons aussi d'étudier le comportement (global et local) de groupe, notamment dans le cas de la traversée de rue. Donikian [7] note que « Les groupes présentent ainsi un comportement plus hardi en acceptant des ouvertures temporelles moins grandes et en forçant davantage les conducteurs de véhicules à ralentir ». Nous pourrions aussi étudier l'impact de piéton retardataire sur un groupe entier lors de la traversée d'une rue ; le formalisme d'automates facilitant la synchronisation et la communication d'automates en empruntant par exemple au domaine de l'orchestration [26].

## Remerciements

Ces recherches s'inscrivent dans le cadre du projet TerraDynamica, soutenu par le fonds unique interministériel (FUI).

## Bibliographie

- [1] T. M. Allen, H. Lunenfeld, G.J. Alexander, Driver information Needs, *Highway Research Board*, Vol. 36, pp. 102-115, 1971.
- [2] R. Ben Larbi, S. Konieczny, P. Marquis, *Planification multi-agent et diagnostic stratégique*, Actes des Quatrièmes Journées Francophones modèles formels de l'interaction (MFI'07), pp. 25-36, 2007.
- [3] V. J. Blue, J.L. Adler, Cellular Automata Microsimulation for Modeling Bi-Directional Pedestrian Walkways, *Transportation Research Journal Part B*, Vol. 35, numéro 3, pp. 293-312, 2001.
- [4] L. Bourgois, A. Oulhaci, J.-M. Auberlet, Simulation de déplacement : Vers un modèle de perception et de prédiction du comportement d'autrui, *Journées Francophones des Systèmes Multi Agent*, 2010.
- [5] L. Bourgois, J. Saunier, J.-M. Auberlet, Towards contextual goal-oriented perception for pedestrian simulation, *International Conference on Agent and Artificial Intelligence*, 2012, à paraître.
- [6] S. Boussetta, A. El Fallah-Seghrouchni, S. Haddad, P. Moraitis, M. Taghelit, *Coordination d'agents rationnels par planification distribuée*, Revue d'intelligence artificielle, vol. 12, no1, pp. 73-101, 1998.
- [7] S. Donikian, Modélisation, contrôle et animation d'agents virtuels autonomes évoluant dans des environnements informés et structurés, *Habilitation à Diriger des Recherches*, Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires, 2004.
- [8] A. El Fallah, S. Pinson, F. Balbo, *Coordination d'actions par planification multi-agent*, Organisation et Applications des SMA, pp. 93-118, 2002.
- [9] J. Ferber, *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris, 1995.
- [10] D. Helbing, P. Molnar, Social force model for pedestrian dynamics, *Physical Review E*, Vol. 51, pp. 4282-4286, 1995.
- [11] S.P. Hoogendoorn, P.H.L. Bovy, Gas-Kinetic modeling and simulation of pedestrian flows, *Transportation Research Record*, pp. 28-36, 2000.
- [12] S. P. Hoogendoorn, W. Daamen, Pedestrian Behavior at Bottlenecks, *Journal Transportation Science*, 2005.
- [13] G. Hutzler, H. Klauedel, D.Y. Wang, Towards Timed Automata and Multi-Agent Systems, *Formal Approaches to Agent Based Systems*, M. G. Hinchey, J. L. Rash, W. F. Truszkowski eds., Lecture Notes in Computer Science 3228, pp. 161-173, 2004.
- [14] A. Johansson, D. Helbing, P.K. Shukla, Specification of the Social Force Pedestrian Model by Evolutionary Adjustment to Video Tracking Data, *Advances in Complex Systems*, Vol. 10, pp. 211-288, 2007.
- [15] U. Ketenci, R. Brémond, J.M. Auberlet, E. Grislin-le Strugeon, Bounded Active Perception *8th European Workshop on Multi-Agent Systems*, 2010.
- [16] F. Lamarche, S. Donikian, La sélection d'action. Le traité de la réalité virtuelle, chapitre 12, *Presses de l'Ecole de Mines de Paris*, Vol. 5, édition 3, 2009.
- [17] J. Malenfant, S. Denier, *ARM: un modèle réflexif asynchrone pour les objets répartis et réactifs*, Actes de LMO 2003, Revue L'Objet, Hermès/Lavoisier, Vol. 9, no 1-2, pp. 91-103, 2003.
- [18] R. Mandiau, D. Hanon, E. Grislin-le Strugeon, Modèles comportementaux appliqués à la navigation de piétons, M.a. Granié, J.m. Auberlet (Ed.), *Le piéton et son environnement - Quelles interactions ? Quelles adaptations ?*, Actes du 1er colloque francophone de la plate-forme intégrative COPIE – Comportement du Piéton dans son Environnement, Les Collections de l'INRETS, Paris, pp. 49-60, 2007.
- [19] B. Moulin, B. Larochelle, Crowdmags, Multi-agent Geo-Simulation of the interactions of a crowd and control forces, *Modelling, Simulation and Identification*, Azah Mohamed, pp. 213-237, 2010.
- [20] M. Moussaid, N. Perozo, S. Garnier, D. Helbing, G. Theraulaz, The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics, *PLoS ONE*, 2010.
- [21] M. Moussaid, G. Theraulaz, Comment les piétons marchent dans la foule, *La recherche*, numéro 450, Sophia, pp. 56-59, 2011.
- [22] J. Ondřej, Modeling and Planning: A Realistic Navigation for Autonomous Virtual Humans, thèse de doctorat, INRIA/INSA, 2011.
- [23] C.W. Reynolds, Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, *Computer Graphics, Special Interest Group in GRAPHICS*, Vol. 21, série 4, pp. 25-34, 1987.
- [24] O. Simonin, J. Ferber, Un modèle multi-agent de résolution collective de problèmes situés multi-échelles, *Journées Francophones des Systèmes Multi-Agents*, 2003
- [25] K. Teknomo, Application of microscopic pedestrian simulation model, *Transportation Research, Part F*, Vol.9, pp. 15-27, 2006.
- [26] P. Traverso, M. Pistore, Automated composition of semantic web services into executable processes. 1st technical report t04-06-08, Istituto Trentino di Cultura, 2004.
- [27] D. Weyns, E. Steegmans, T. Holvoet. Towards active perception in situated multi-agent systems, *Applied Artificial Intelligence*, Vol. 18, pp. 867-883, 2004.