



**HAL**  
open science

# Modèle microscopique à influence macroscopique pour la simulation des déplacements de piétons autonomes en temps réel

Patrick Simo Kanmeugne, Aurélie Beynier, Jean-Yves Donnart

## ► To cite this version:

Patrick Simo Kanmeugne, Aurélie Beynier, Jean-Yves Donnart. Modèle microscopique à influence macroscopique pour la simulation des déplacements de piétons autonomes en temps réel. Vingt-et-unièmes journées francophones sur les systèmes multi-agents (JFSMA'13 ), Jul 2013, Lille, France. hal-00876070

**HAL Id: hal-00876070**

**<https://hal.science/hal-00876070v1>**

Submitted on 23 Oct 2013

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

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

# Modèle microscopique à influence macroscopique pour la simulation des déplacements de piétons autonomes en temps réel

Patrick Simo Kanmeugne<sup>ab</sup>  
patrick.simo-kanmeugne@lip6.fr  
patrick.simokanmeugne@thalesgroup.com

Aurélie Beynier<sup>a</sup>  
aurelie.beynier@lip6.fr

Jean-Yves Donnart<sup>b</sup>  
jean-yves.donnart@thalesgroup.com

<sup>a</sup>Laboratoire d'Informatique de Paris 6,  
Université Pierre et Marie Curie, France

<sup>b</sup>Thales Training & Simulation,  
Thales Group, France

## Résumé

*Cet article présente une nouvelle approche pour la simulation des déplacements de piétons autonomes en temps réel dans un environnement urbain. Partant du constat que les modèles actuels sont divisés entre représentation macroscopique et représentation microscopique du déplacement, nous proposons une approche posant le problème d'une manière plus générique afin de s'abstraire au maximum de ce clivage. Pour cela nous présentons un modèle microscopique à influence macroscopique qui tient conjointement compte de l'évolution du trafic et des interactions les plus élémentaires qui ont lieu lors du déplacement des piétons. Ces interactions sont le fruit des dépendances qui se créent naturellement entre les déplacements de piétons et qui influencent leurs plans. Les simulations que nous avons réalisées montrent des résultats encourageants aussi bien en termes de crédibilité que de temps de calcul.*

**Mots-clés :** *simulation multi-agents, interaction entre agents, coordination, planification*

## 1 Introduction

La simulation des déplacements des piétons est un exercice complexe, fortement connecté aux problématiques de simulation comportementale dans les systèmes multi-agents. En effet, bien qu'autonome dans son déplacement, tout piéton est malgré tout dépendant des déplacements des autres piétons autour de lui. Cette dépendance influence sa trajectoire, et plus généralement, l'élaboration de son chemin [4]. Nous nous intéressons à la simulation des déplacements de piétons en temps réel dans un environnement urbain. Compte tenu de la nature de l'environnement – potentiellement très dense et très dynamique – nous choisissons de mettre

l'évolution du trafic, ainsi que les interactions provoquées par les dépendances qui se créent entre les déplacements des piétons, au cœur de notre réflexion. Notre objectif est de déterminer des éléments de modélisation pertinents pour la mise en œuvre d'une simulation crédible, c'est-à-dire, convaincante du point de vue d'un observateur non expert, et capable de prédire des scènes de navigation de la vie courante.

Traditionnellement, la simulation des déplacements d'acteurs mobiles en temps réel est abordée suivant deux grandes familles d'approches : les *approches microscopiques* et les *approches macroscopiques*.

Les **approches microscopiques** – dans lesquelles les acteurs sont les entités élémentaires – s'appuient essentiellement sur des règles et des algorithmes d'évitement de collisions pour reproduire le déplacement des acteurs [3, 7, 10, 18]. Pour ce type d'approche, le déplacement d'un acteur se décompose en deux phases [1] : (a) une phase de planification qui consiste à rechercher un chemin constitué de points de passage qui relie une origine et une destination et contourne les obstacles fixes ; (b) une phase de suivi, pendant laquelle les agents se déplacent le long du chemin trouvé tout en évitant les collisions avec les obstacles mobiles.

Les **approches macroscopiques** – où les entités élémentaires sont des flux continus de particules – s'appuient quant à elles sur des lois macroscopiques inspirées de la dynamique des fluides [9]. Ces approches formalisent le déplacement comme un seul problème d'optimisation qui consiste à maintenir, en temps réel et dans un espace navigable finement discrétisé, un champ de vecteurs orientés dans le sens contraire du gradient d'une fonction de potentiel dynamique. Cette fonction est définie en chaque point de

l'espace. Le potentiel dépend du temps et de la distance jusqu'au but, et dans certains travaux, de la densité d'acteurs [20]. Le déplacement des acteurs est dicté par le champ de vecteurs et l'évitement de collisions est pris en charge à posteriori par un module externe.

Appliquées au déplacement des piétons, les simulations conçues sur la base de ces deux familles d'approches présentent deux insuffisances typiques :

1. Les approches microscopiques s'appliquent mal à une grande quantité d'acteurs. Malgré une grande faculté à reproduire des trajectoires respectant les contraintes de motricité des piétons, ces approches peinent à reproduire des phénomènes de déplacement de foule connus, comme les regroupements [9].
2. Les approches macroscopiques sont fondamentalement basées sur une métaphore entre le déplacement d'un acteur et le mouvement d'une particule de fluide [8]. Elles produisent donc des résultats crédibles essentiellement lorsque la population est dense, et s'avèrent limitées pour modéliser les piétons dans leurs déplacements courants.

Fatalement, les insuffisances des unes constituent les avantages des autres, ce qui conduit à un dilemme au moment de construire des simulations avec une densité d'acteurs variable.

Nous tenons à nuancer la notion de *crédibilité* avec celle de *temps de calcul*. Par *crédibilité*, nous entendons la capacité d'une simulation à reproduire des phénomènes vérifiables dans la réalité quelque soit le nombre d'acteurs, et à être convaincante du point de vue d'un observateur non expert. Le temps de calcul permet d'évaluer le passage à l'échelle et non la *crédibilité* telle que nous la définissons. Pour évaluer la *crédibilité*, les auteurs convergent sur des méthodologies comprenant généralement deux volets : (a) une évaluation *phénoménologique*, qui consiste à mettre en scène des situations réelles, et à vérifier que la simulation reproduit les phénomènes observés dans ces situations ; (b) une évaluation qualitative des trajectoires pour vérifier que celles-ci respectent les contraintes de motricité des piétons [19].

La problématique que nous retenons pour la simulation des déplacements de piétons en temps réel s'expose de la manière suivante : étant admis que les piétons sont autonomes dans leurs décisions, comment modéliser le déplacement

des piétons de manière à obtenir une simulation crédible quelque soit le nombre d'acteurs ? De plus, l'environnement pouvant être potentiellement très dense et très dynamique, et les ressources de calcul étant limitées, quelle architecture de simulation mettre en place pour obtenir des temps de calcul raisonnables, c'est-à-dire permettant le passage à l'échelle ?

## 2 Gestion des interactions

La plupart des approches microscopiques font l'hypothèse que les acteurs interagissent en vue d'éviter les collisions entre eux, et proposent, pour mettre en œuvre ces interactions, des modèles d'évitement de collision entre un acteur et ses voisins les plus proches, qui s'exécutent dans la phase de suivi de chemin. Ainsi, des *modèles géométriques* proposent un calcul exact ou approché de la vitesse d'un acteur en fonction de la vitesse d'approche et de l'encombrement de ses voisins les plus proches [14, 21]. Des *modèles à base de règles* proposent des déplacements prédictifs qui s'appuient sur des études de cas [15]. Les *modèles de force* calculent la position d'un acteur en temps réel à partir d'un ensemble de forces liées à son voisinage immédiat [7, 12, 13, 16].

Sans remettre en cause l'efficacité de ces différents modèles, remarquons que si les interactions se limitent à un évitement de collision naïf avec les voisins les plus proches, alors la planification – qui calcule des points de passages jusqu'au but final – et le suivi de chemin renvoient des consignes de déplacement potentiellement contradictoires. En effet, afin d'éviter les collisions, un acteur peut être obligé de s'éloigner du chemin indiqué par la planification – d'où les problèmes de *crédibilité* des approches microscopiques en cas de forte densité, notamment les oscillations et les minima locaux [20]. Plus génériquement, un algorithme d'évitement de collision, par définition, ne fait que capturer des collisions imminentes, et est peu susceptible de générer un déplacement humainement cohérent, sans référence au but final et à la dynamique macroscopique de l'environnement. En effet, comme le montrent plusieurs études en psychologie, les piétons construisent leurs déplacements, comme tout autre comportement, en fonction d'une appréciation subjective de l'effort nécessaire pour atteindre leur but [22]. Cette appréciation évolue en fonction de leur perception de la dynamique de l'environnement et peut être à l'origine de changements de trajectoire plus complexes [5].

Sur ce dernier point, les approches macroscopiques, grâce à la notion de potentiel dynamique, apportent des éléments de modélisation plus objectifs. Seulement, elles sacrifient la dynamique microscopique des déplacements au profit la dynamique macroscopique de l'environnement qui en est pourtant issue.

Nous nous proposons d'enrichir la notion d'*interaction liée au déplacement des piétons* dans un environnement dense et dynamique. Nous introduisons pour cela une notion de *ressource de déplacement* dans un système multi-agent où les agents représentent des piétons. Les ressources de déplacement sont communes à tous les agents et exploitées par eux pour construire leurs itinéraires. À cause de la congestion du trafic générée par les déplacements des agents, elles pourront s'avérer «défectueuses» voire «inutilisables» forçant ainsi les agents à trouver des compromis entre eux, ou à réajuster leur chemin pour emprunter des ressources plus «appropriées». L'ensemble des ressources offre aux agents une vision macroscopique fiable d'un environnement dynamique et un support navigation plus adapté au temps réel. Notre approche tient conjointement compte des *interactions entre piétons* et de *l'évolution du trafic*. Elle nous permettra d'obtenir des résultats crédibles des points de vues microscopique et macroscopique sans avoir à passer d'un modèle à un autre.

Notre travail peut être considéré comme une concrétisation du paradigme influence/réaction introduit par Ferber et Müller, avec cette particularité que non seulement les agents influencent l'environnement – à travers les ressources – mais aussi, ils raisonnent sur le trafic de manière consistante via ces mêmes ressources [2].

### 3 Modèle microscopique à influence macroscopique

#### 3.1 Description du problème

Pour décrire le déplacement d'un agent, nous supposons que le plan de l'espace navigable est muni d'un réseau de mailles (voir figure 1), où chaque maille est une *ressource élémentaire* que les agents sollicitent afin de planifier leurs *itinéraires*. Le réseau de maille est une discrétisation uniforme de l'espace et l'optimalité de sa construction n'est pas abordée dans cet article.

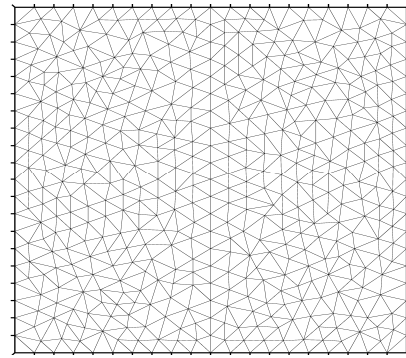


FIGURE 1 – Exemple de réseau de mailles

Un *itinéraire* est une *suite de ressources* à utiliser dans un ordre précis.

La *tâche* d'un agent consiste à se rendre d'un point *A* (sa position courante) à un point *B*. Pour cela, il recherche et maintient à jour un itinéraire qui relie sa position courante à sa destination finale et qui satisfait ses *préférences*.

Les *préférences* d'un agent déterminent la manière dont il évalue son itinéraire. Elles traduisent intuitivement une manière d'apprécier l'effort lié à la tâche. Par exemple, un agent qui utilise la *distance du trajet* comme critère d'évaluation aura tendance à choisir des itinéraires de courte distance. Celui qui utilise *le temps de trajet* préférera des itinéraires qui lui permettent d'arriver à son but le plus vite possible. Contrairement à la distance de trajet, qui est indépendante du trafic, le temps de trajet, lui, varie justement en fonction du trafic courant. En particulier, un piéton peut légitimement réévaluer son temps de trajet sur un itinéraire à cause de la congestion engendrée par un trafic qui se densifie. Suivant cet ordre d'idée, nous distinguons deux types de préférences : des *préférences sur des critères statiques* – comme la distance du trajet – qui sont indépendantes du trafic, et des *préférences sur des critères dynamiques* qui déterminent spécifiquement la manière dont un agent évalue son itinéraire dans un environnement dynamique dont il n'a qu'une connaissance imparfaite. Une liste non exhaustive de ce type de préférences est donnée dans le tableau 1.

Pour mettre en œuvre l'évaluation d'un itinéraire en fonction de ce dernier type de préférences, nous définissons localement à chaque ressource, un ensemble de mesures stochastiques – *mesures de qualité* – déduites de la simulation, que les agents agrègent afin d'effec-

Préférences	Planification
Éviter les itinéraires trop fréquentés	Évaluer l'itinéraire en fonction de la fréquentation des ressources
Avancer le plus vite possible	Évaluer l'itinéraire en fonction du temps de parcours sur les ressources

TABLE 1 – Quelques préférences de déplacement

tuer des choix consistants avec l'évolution du trafic. Ces mesures de qualité sont définies à partir d'un *historique* de taille finie de l'évolution des états des ressources. La limitation de l'historique des états des ressources permet automatiquement de localiser la perception de la dynamique de l'environnement. Ainsi un acteur acteur réagira en fonction de ce qui l'influence, sans risquer de prendre en compte des événements qui ne sont plus d'actualité.

Soit  $\mathcal{R}$  l'ensemble des ressources, et  $r, r_x, r_y \in \mathcal{R}$ . Par la suite nous utiliserons les notations suivantes :

- ▷  $M \in r$  : le point  $M$  est à l'intérieur du contour délimité par  $r$
- ▷  $r_x \in v(r_y)$  où  $v(r_y)$  correspond aux mailles voisines à  $r_x$  dans le réseau :  $r_x$  et  $r_y$  sont voisins dans le réseau
- ▷  $pref(r)$  : mesure de qualité associée à  $r$  suivant la préférence  $pref$  de l'agent
- ▷  $c_{AB} = (r_i)_{i \leq k}, k \in \mathbb{N}, r_i \in \mathcal{R}$  : itinéraire allant d'un point  $A$  à un point  $B$  et constitué d'une suite de  $k + 1$  ressources.

Les ressources  $r_i$  d'un itinéraire allant de  $A$  à  $B$  doivent satisfaire au moins les trois propriétés suivantes :

$$\begin{cases} A \in r_0 \\ B \in r_k \\ r_{i+1} \in v(r_i), \forall i < k \end{cases} \quad (1)$$

- ▷  $pref(c_{AB})$  : mesure de qualité associée à l'ensemble de l'itinéraire  $c_{AB}$  suivant la préférence  $pref$  de l'agent.

Un agent préférera un itinéraire  $c'_{AB}$  à un itinéraire  $c_{AB}$ , suivant la préférence  $pref$ , si et seulement si

$$pref(c'_{AB}) \geq pref(c_{AB}) \quad (2)$$

### 3.2 Ressources et interactions

Une interaction correspond à la mise en relation de deux ou plusieurs agents par le biais de leur déplacement. Le déplacement étant l'utilisation d'une suite de ressources dans un ordre précis, nous posons que :

1. Deux ou plusieurs agents n'interagissent que s'ils *sollicitent* les mêmes ressources élémentaires.
2. Le service fourni par une ressource élémentaire est un *service de transport*. En d'autres termes, une ressource est utilisée pour aller d'un lieu à un autre, avec une *qualité de service*, évaluée du point de vue des agents en fonction de leurs préférences.
3. Chaque ressource élémentaire définit une *politique de service* qui détermine la manière dont elle doit être utilisée. Par la suite nous considérons que chaque ressource définit un *ordre de priorité*. Lorsque plusieurs agents sollicitent une même ressource, celle-ci est utilisée par l'agent le plus prioritaire. Par souci de simplicité, cet ordre de priorité sera l'ordre chronologique des sollicitations. Malgré la politique de service, des conflits peuvent survenir, les agents impliqués engagent alors des *procédures d'évitement de conflit* que nous présentons ultérieurement (voir section 3.4). Des formes de politique de service plus complexes peuvent être mises en place.
4. Chaque ressource élémentaire comprend un *buffer* de taille finie et paramétrable. Occupent ce *buffer*, les agents qui ont sollicité la ressource et attendent de pouvoir l'utiliser, ainsi que l'agent qui utilise la ressource. Lorsqu'un *buffer* atteint sa taille maximale, aucun agent supplémentaire ne peut solliciter la ressource associée.

À partir des hypothèses ci-dessus, le déplacement des agents se ramène à un problème de routage dans un réseau congestionné, qui est un cas particulier de jeu de congestion [17]. En effet, les ressources utilisées par les agents pour planifier leurs déplacements, ont un coût qui dépend de leur utilisation. La différence avec le cadre des jeux de congestion est que, non seulement les ressources peuvent devenir de mauvaise qualité ou «défectueuses» du fait du nombre de sollicitations, mais elles peuvent aussi devenir «inutilisables» si le *buffer* associé atteint sa taille maximale.

### 3.3 Modélisation des préférences sur critères dynamiques

**Analogie entre une ressource et une file d'attente.** À partir de l'utilisation des ressources, nous pouvons déduire des mesures permettant de raisonner sur l'évolution du trafic. En effet, une ressource peut être dans  $n + 1$  états différents, où  $n$  désigne la taille maximale du *buffer*. Les transitions entre états sont déclenchées par deux types d'évènements : une «nouvelle sollicitation» ou «arrivée», et une «fin de service» ou «départ», qui émanent du déplacement des agents. Lorsque plusieurs évènements arrivent simultanément pour une ressource, ceux-ci sont traités de manière séquentielle.

En supposant que les états des ressources sont observables, le changement d'état d'une ressource obéit au phénomène stochastique de *file d'attente*. En théorie du trafic, une file d'attente se crée à chaque fois que des *unités* (clients), souhaitent obtenir un *service* d'un *producteur* (serveur). Il est possible de prédire la dynamique d'une file d'attente si les lois de probabilités sur les instants d'arrivée et sur la durée du service fourni sont connues, de même que la politique de service au sein de la file [23]. Nous pouvons exploiter ce formalisme en supposant que les unités représentent les piétons, que le service fourni est un service de transport, et que chaque unité respecte la politique de service définie au sein de chaque ressource (voir section 3.2). L'historique des états que nous définissons pour chaque ressource permet d'estimer les probabilités sur les instants d'arrivée et sur la durée de service.

**Variabiles stochastiques d'une ressource.** Les variables suivantes permettent de raisonner sur l'évolution du trafic localement à une ressource  
 ▷  $q_c$  : état courant de la ressource.

▷  $\mathcal{H}_m^{(e)}$  : historique de taille  $m$  des états de la ressource. Le  $i^{eme}$  élément de  $\mathcal{H}_m^{(e)}$  est noté  $h_i^{(e)}$  et indique l'état de la ressource à l'étape  $i$ .

▷  $\mathcal{H}_m^{(d)}$  : historique de taille  $m$  des départs vers les ressources voisines. Le  $i^{eme}$  élément de  $\mathcal{H}_m^{(d)}$  est noté  $h_i^{(d)}$  et indique s'il y a eu un départ à l'étape  $i$  :

$$h_i^{(d)} = \begin{cases} 1 & \text{si } h_i^{(e)} < h_{i-1}^{(e)} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

▷  $\mathcal{H}_m^{(a)}$  : historique de taille  $m$  des arrivées en provenance des ressources voisines. Le  $i^{eme}$

élément de  $\mathcal{H}_m^{(a)}$  est noté  $h_i^{(a)}$  et indique s'il y a eu une arrivée à l'étape  $i$  :

$$h_i^{(a)} = \begin{cases} 1 & \text{si } h_i^{(e)} > h_{i-1}^{(e)} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

▷ Les fréquences d'arrivée  $\lambda$  et de départ  $\mu$  :

$$\lambda = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m h_i^{(a)} \quad (3)$$

$$\mu = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m h_i^{(d)} \quad (4)$$

▷  $P_c(q)$  : distribution de probabilités sur les états, calculée à partir de  $\mathcal{H}_m^{(e)}$ .  $P_c(q)$  représente la probabilité que «l'état courant de la ressource soit égal à  $q$ » avec  $q \in \{0 \dots n\}$

$$P_c(q) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sigma^{(e)}(i, q) \quad (5)$$

$$\sigma^{(e)}(i, q) = \begin{cases} 1 & \text{si } h_i^{(e)} = q \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

**Calcul des mesures de qualité**<sup>1</sup>. Afin de modéliser les préférences décrites dans le tableau 1, nous définissons les mesures de qualité suivantes (la liste peut être facilement étendue afin de définir d'autres mesures traduisant d'autres types de préférences) :

▷ Taux de fréquentation  $E[Q]$

$$E[Q] = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m h_i^{(e)} \quad (6)$$

▷ Probabilité de blocage  $\mathcal{P}_b$

$$\mathcal{P}_b = P_c(n) \quad (7)$$

Où  $n$  est la taille maximale du *buffer*.

▷ Temps moyen de traversée  $E[D]$  (temps écoulé entre la sollicitation et la fin du service). Pour calculer cette estimation nous utilisons la loi de *Little* qui s'applique à l'analyse des files d'attente [23]. Cette loi stipule que le nombre moyen de clients dans une file d'attente, est égal au produit de la fréquence moyenne d'arrivée  $\lambda$  par le temps moyen passé dans la file  $E[D]$ . En d'autres termes,

$$\lambda \cdot E[D] = E[Q] \quad (8)$$

1. La notation pour les mesures est calquée sur les standards utilisés dans la théorie des files d'attente

d'où la formule suivante :

$$E[D] = \lambda^{-1} \cdot \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m h_i^{(e)} \quad (9)$$

Ainsi, les préférences explicitées dans le tableau 1 peuvent se traduire par :

- ▷ Éviter les itinéraires bloqués : privilégier les ressources  $r$  avec une faible probabilité de blocage ( $pref_1(r) = s_1 - \mathcal{P}_b$ )
- ▷ Éviter les itinéraires trop fréquentés : privilégier les ressources  $r$  avec un faible taux de fréquentation ( $pref_2(r) = s_2 - E[Q]$ )
- ▷ Avancer le plus vite possible : éviter les ressources  $r$  qui ont un temps moyen de traversée important ( $pref_3(r) = s_3 - E[D]$ )

Où  $s_j$  désigne un seuil propre à chaque préférence qui permet de juger de l'importance d'une ressource.

### 3.4 Navigation

Nous considérons que, pour un agent, la planification d'itinéraire en temps réel comprend deux phases : une phase d'initialisation, pendant laquelle l'agent calcule un premier itinéraire satisfaisant essentiellement des préférences sur critères statiques ; une phase de mise à jour, pendant laquelle l'agent réajuste localement son itinéraire en tenant compte de préférences sur critères dynamiques afin de s'adapter au trafic, et de ses préférences sur critères statiques pour guider la convergence de la mise à jour. La mise à jour est réactualisée au fur et à mesure que l'agent se déplace. Ces deux phases traduisent la résolution d'un seul problème d'optimisation que nous formalisons comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Point de départ} = A \\ \text{Point d'arrivée} = B \\ \text{Calculer un itinéraire } c_{AB} = (r_i)_{i < k} \text{ tel que} \\ \max pref_{j_s}(c_{AB}) \\ pref_{j_d}(r_i) > 0 \\ 0 \leq j_s < p_s \text{ et } 0 \leq j_d < p_d \end{array} \right. \quad (10)$$

Où  $pref_{j_s}$  et  $pref_{j_d}$  représentent respectivement les préférences sur les critères statiques et dynamiques prises en compte par l'agent. Agréger plusieurs préférences se ramène à sélectionner les ressources qui satisfont toutes les préférences  $j_d$  et maximisent les préférences  $j_s$ .

La figure 2 représente une architecture minimale du processus de navigation des agents.

Au début du processus, chaque agent calcule un itinéraire initial à partir de sa position courante.

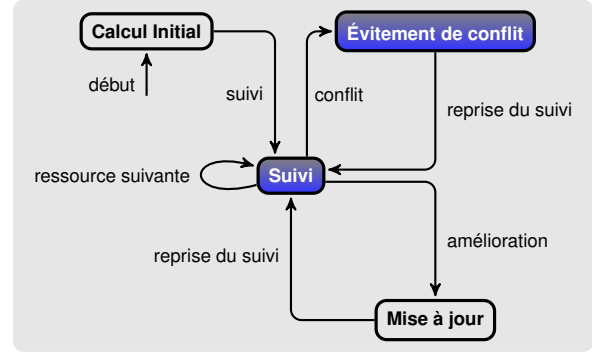


FIGURE 2 – Planification et suivi de chemin

Une fois le calcul terminé, l'agent se déplace de ressource en ressource jusqu'à sa destination en respectant la politique de service dans chaque ressource. C'est-à-dire, en laissant la priorité à ceux qui sollicitent la ressource avant eux, et en ne sollicitant une ressource que si une place  $y$  est disponible. Dans le cas où aucune place n'est disponible, l'agent s'immobilise dans sa ressource courante. Suivant une fréquence définie (en termes de pas de temps), l'agent évalue son itinéraire et le réajuste s'il existe un autre itinéraire de meilleure qualité.

Un conflit peut survenir entre agents, empêchant le passage d'une ressource à une autre. Un conflit est une situation d'inter-blocage entre deux ou plusieurs agents. Soient, par exemple, deux agents  $\alpha$  et  $\beta$ , utilisant respectivement deux ressources voisines et saturées  $r_\alpha$  et  $r_\beta$ . Si  $\alpha$  désire se rendre en  $r_\beta$ , et  $\beta$  en  $r_\alpha$ , le seul respect de la politique obligera les deux agents à s'immobiliser indéfiniment. En effet, un agent ne sollicite une ressource que si une place  $y$  est disponible. Dans une situation de conflit, les agents concernés doivent engager des *procédures d'évitement de conflit* pour continuer à progresser vers leur but.

Les actions constituant le comportement d'un agent, et décrites dans la figure 2, sont détaillées comme suit :

1. *Calcul initial* consiste à calculer un chemin sous optimal qui sera mis à jour en fonction des préférences de l'agent.
2. *Suivi* est composée de deux sous-actions :
  - ▷ Laisser la priorité : l'agent n'a pas la priorité dans la ressource courante et cède le passage à l'agent prioritaire.
  - ▷ Utiliser : l'agent a la priorité et peut utiliser la ressource pour progresser sur son itinéraire, en évitant les collisions. Le passage à la ressource suivante s'effectue

---

**Algorithme 1:** Replanification dynamique du chemin d'un agent  $a$ 

---

**Données :** Préférences sur critères dynamiques de l'agent  $a$  :  $pref_{j \geq 1}$   
Seuil maximal de tolérance pour  $pref_{j \geq 1}$  :  $s_j$   
Chemin courant de l'agent  $a$  :  $c$

**Résultat :** Mise à jour de  $c$   
**début**

```
 $c^* \leftarrow$  plus court chemin passant par les ressources  $r$ 
telles que,  $pref_{j \geq 1}(r) > 0$ 
si  $c^*$  est plus court ou de meilleure qualité que  $c$ 
alors
   $c \leftarrow c^*$  ;
```

---

si et seulement si celle-ci n'est pas saturée.

3. *Mise à jour* consiste à améliorer l'itinéraire suivant les préférences de l'agent. Par souci de simplicité nous considérons que la *distance du trajet*, qu'on notera  $pref_0$ , est une préférence sur critère statique partagée par tous les agents. L'algorithme 1 décrit une heuristique permettant à un agent de mettre à jour son itinéraire. Cette heuristique consiste à calculer un plus court chemin passant par les ressources  $r$ , telles que  $pref_{j \geq 1}(r) > 0$ , où  $pref_{j \geq 1}$  représentent les préférences sur critères dynamiques.
4. *Évitement de conflit* déclenche une procédure permettant de trouver un compromis à une situation de conflit.

## 4 Premiers résultats

Dans cette section nous évaluons l'apport qualitatif de notre modèle pour la simulation des déplacements de piétons en temps réel. Pour cela, nous utilisons le scénario illustré dans la figure 3 à savoir, deux groupes d'agents se déplaçant d'une extrémité à l'autre d'un plan en forme de boucle. Afin de se rapprocher des situations réelles de la vie courante, les vitesses de déplacement des agents sont variables d'un agent à un autre.

L'espace navigable est une triangulation uniforme générée automatiquement grâce au logiciel libre FreeFem++<sup>2</sup>. Les ressources (1097 au total) correspondent aux différents triangles. Deux ressources sont voisines dans le réseau si elles partagent un côté.

---

2. <http://www.freefem.org/>

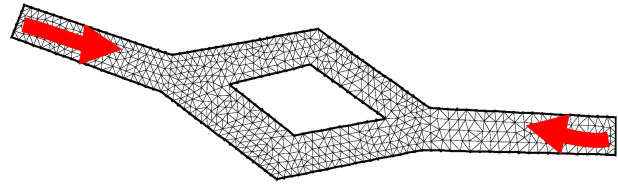


FIGURE 3 – Scénario de navigation

Nous nous servons de la bibliothèque libre OpenSteer<sup>3</sup> pour mettre en œuvre des algorithmes de suivi de chemin et d'évitement de collisions. L'itinéraire de départ est généré grâce à un algorithme de plus court chemin qui construit une suite de ressources jusqu'au but en minimisant la longueur du chemin passant pas les centres de triangles. Pour gérer les conflits éventuels entre deux agents, nous utilisons une procédure d'évitement de conflit qui consiste à choisir aléatoirement entre :

- ▷ mettre à jour le chemin en évitant la ressource à l'origine du conflit
  - ▷ échanger les places avec l'autre agent
- D'autres formes d'évitements de conflit peuvent être mises en place.

Le champ de perception est illimité dans l'espace dans cette expérimentation. Nous nous sommes, en effet, concentrés sur l'articulation entre dynamique microscopique des déplacements et dynamique macroscopique de l'environnement.

Nous avons effectué deux types de simulation. Dans la première, les agents se déplacent en évitant les collisions le long de leur chemin initial. Dans la deuxième, nous utilisons notre modèle avec comme préférence sur critère dynamique, le *taux de fréquentation*, et une fréquence de mise à jour égale à une seconde. Ci dessous, nous présentons quelques résultats.

### 4.1 Crédibilité

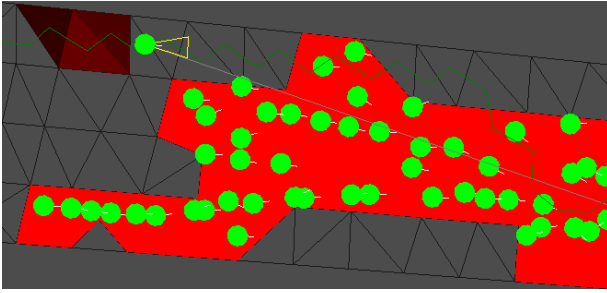
Les simulations font ressortir quelques phénomènes complexes démontrant la crédibilité des déplacements et attribuables à notre modèle.

**Formation de file et stationnements dus à la congestion.** Nous observons, surtout au voisinage des points de destinations, des phénomènes de formation de file et de stationnement (figure 4(a)). En effet, au fur et à mesure que les agents arrivent à leur destination, la ressource correspondante devient de plus en plus sollicitée et atteint parfois sa taille maximale. La saturation se

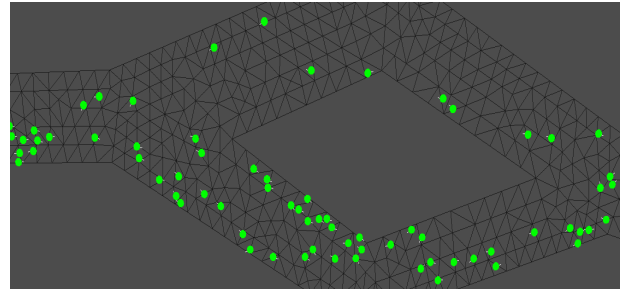
---

3. <http://www.opensteer.sourceforge.net/>

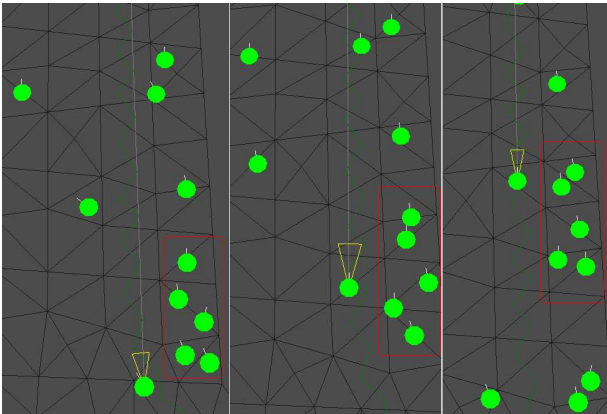




(a) Stationnement : à l'approche du point de destination et en cas de forte densité, les agents stationnent autour de la ressource correspondant au but. La saturation sur cette ressource se propage (en rouge) sur les ressources voisines, tant qu'aucune place ne se libère sur cette dernière.



(b) Répartition sur l'espace navigable : ici les agents préfèrent les «itinéraires les moins fréquentés».



(c) Contournement de groupe : l'agent met à jour son itinéraire de manière à éviter les ressources utilisées par les agents se déplaçant de manière groupée qui se trouvent devant lui.

FIGURE 4 – Illustration de quelques comportements complexes

propage dans le voisinage de la ressource tant qu'aucune place ne se libère.

**Mise à jour réaliste de l'itinéraire et répartition sur l'espace navigable.** Malgré la topologie en forme de boucle, les agents se répartissent sur toutes les branches de l'espace navigable (figure 4(b)). En effet, les mesures de qualité associées aux ressources varient en fonction du taux de fréquentation des ressources (voir section 3), et les mises à jour régulièrement effectuées par les agents leur permettent de tenir compte de ces variations en temps réel. Les agents peuvent donc réajuster leurs itinéraires afin d'exploiter des ressources situées sur la branche la moins fréquentée.

**Contournement de groupe.** La simulation reproduit des scènes de contournement de groupe. Il s'agit d'un agent qui contourne simultanément plusieurs autres agents évoluant de façon groupée. Ce phénomène s'explique par le fait que lorsqu'un agent se rapproche d'un groupe d'agents, il a tendance à mettre à jour son iti-

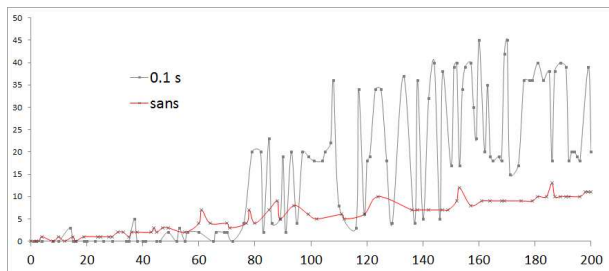
néraire de manière à éviter l'ensemble de ressources utilisées par ces agents.

## 4.2 Temps de calcul

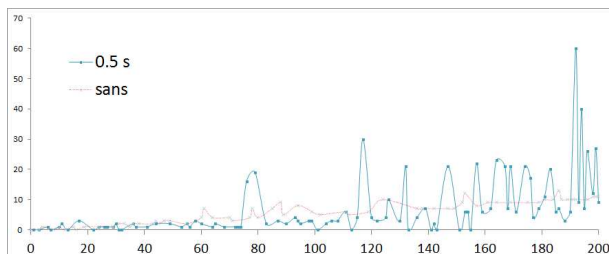
L'une des caractéristiques de notre modèle, par rapport aux modèles classiques, est l'usage fréquent des mises à jour d'itinéraires. Il est important de s'assurer que ces mises à jour n'impliquent pas une surcharge de calcul trop importante qui serait nuisible au rendu de la simulation. Dans notre expérimentation, nous avons comparé les temps de calcul par cycle, pour les deux types de simulation, en faisant varier la fréquence de mise à jour dans notre modèle entre 0 et 1 seconde. La figure 5 montre que le modèle réalise une meilleure performance pour une fréquence d'une mise à jour par seconde.

Ces résultats nous permettent de déduire que notre modèle, en privilégiant des petites mises à jour d'itinéraires, plutôt que des évitements de collisions fréquents (potentiellement coûteux en cas de forte densité), permet de diminuer la

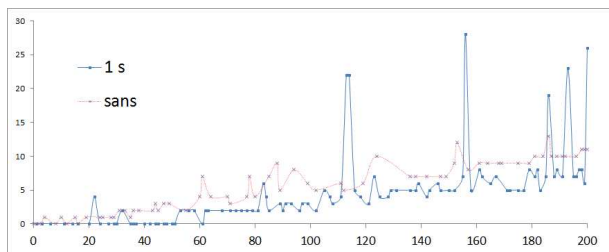
charge de calcul et d'obtenir un meilleur rendu de simulation. Néanmoins, les mises à jour ne doivent pas être trop fréquentes. Signalons aussi que la taille de l'environnement (nombre de ressources) est un facteur clef pour les temps de calcul, et qu'il est nécessaire d'effectuer plusieurs expérimentations avec des topologies différentes et de taille variable pour une évaluation plus complète du modèle.



(a) fréquence de mise à jour = 0.1s



(b) fréquence de mise à jour = 0.5s



(c) fréquence de mise à jour = 1s

FIGURE 5 – Temps de calcul par cycle (en millisecondes) en fonction du nombre d'agents. Notre modèle est labellisé par la fréquence de mise à jour. Le label «sans» représente les résultats du modèle utilisé pour la comparaison

## 5 Conclusion et perspectives

Nous avons présenté une nouvelle approche pour la simulation des déplacements de piétons en temps réel dans un environnement urbain. L'originalité de notre démarche, par rapport aux travaux du domaine, est que nous tenons conjointement compte des interactions, qui sont le fruit des dépendances qui se créent entre les déplacements des piétons, et de l'évolution

du trafic dans l'élaboration des déplacements. Nous avons proposé et mis en place un *modèle microscopique à influence macroscopique*, grâce auquel nous reproduisons des comportements individuellement et collectivement crédibles. Les résultats obtenus sont encourageants pour la suite de nos travaux, d'autant plus que notre modèle peut contribuer à économiser des ressources de calcul.

Quelques aspects méritent toutefois d'être approfondis à court terme :

### 5.1 Priorité au sein d'une ressource

Outre le système de priorité dont nous avons implémenté un exemple pour notre évaluation (priorité par rapport à l'ordre chronologique des sollicitations), nous envisageons de mettre en place d'autres formes de politique de service. L'une d'entre elles est le «partage de ressource», où plusieurs acteurs pourraient utiliser une ressource simultanément en coordonnant leurs déplacements. Les procédures d'évitement de conflit peuvent aussi être enrichies et s'étendre à plus de deux agents.

### 5.2 Planification hiérarchique

La mise à jour d'un itinéraire peut être relativement coûteuse si la complexité est fonction de la taille de l'environnement. Nous envisageons d'exploiter une représentation hiérarchique de l'environnement pour la planification et la mise à jour d'itinéraires. La hiérarchisation permettrait de limiter l'espace de recherche.

### 5.3 Heuristique de mise à jour

L'heuristique de mise à jour que nous avons proposée est une illustration des possibilités que notre approche permet. Nous souhaitons, par la suite, exploiter différentes mesures d'agrégation traduisant des préférences plus complexes.

### 5.4 Champ de perception

Nous avons supposé que le champ de perception de l'acteur est illimité dans l'espace. En effet, nous souhaitons nous concentrer beaucoup plus sur l'articulation entre dynamique microscopique des déplacements et dynamique macroscopique de l'environnement. Pour la suite, nous envisageons de limiter la perception dans l'espace pour chaque agent en tenant compte

de l'occlusion visuelle et d'un rayon de perception. La recherche d'itinéraire s'en trouvera modifiée car les ressources concernées par la mise à jour seront uniquement celles qui sont «physiquement» perçues par l'agent.

## 5.5 Observateur non expert

Enfin, nous envisageons de soumettre nos simulations à l'appréciation d'observateurs non experts, pour mieux juger de la crédibilité des résultats.

**Note** : le travail présenté dans cet article s'inscrit dans le cadre du projet de recherche et d'innovation, Terra Dynamica<sup>4</sup>, labellisé par les pôles de compétitivité Cap Digital et Advancity, et financé par :

- le ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie : Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services,
- le Conseil Régional d'Ile de France,
- le Conseil Régional d'Aquitaine,
- le Conseil Général des Yvelines,
- le Conseil Général de Seine-Saint-Denis,
- le Conseil Général du Val d'Oise,
- la Ville de Paris

## Références

- [1] F. DAPPER, E. PRESTES et L. P. NEDEL : Generating steering behaviors for virtual humanoids using bvp control. *Proc of Computer Graphics International RJ Brazil*, p. 105–114, 2007.
- [2] J. FERBER et J.-P. MÜLLER : Influences and reaction : a model of situated multiagent systems. *In Proceedings of Second International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-96)*, p. 72–79, 1996.
- [3] P. FIORINI et Z. SHILLER : Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles. *The International Journal of Robotics Research*, 17 (7):760–772, 1998.
- [4] E. GOFFMAN : The Individual As A Unit. Relation in Public : Microstudies of the Public Order. *Allen Lane The Penguin Press*, 1972.
- [5] R. G. GOLLEDGE : Path Selection and Route Preference in Human Navigation : A Progress Report. *Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS International Conference COSIT 95 Semmering Austria Proceedings*, 988/1995(277):207–222, 1995.
- [6] S. J. GUY, J. CHHUGANI, S. CURTIS, P. DUBEY, M. LIN et D. MANOCHA : PLEdestrians : A Least-Effort Approach to Crowd Simulation. *Computing*, p. 119–128, 2010.
- [7] D. HELBING et P. MOLNAR : Social Force Model for Pedestrian Dynamics. *Physical Review E*, 51(5): 4282–4286, 1998.
- [8] L. F. HENDERSON : On the fluid mechanics of human crowd motion. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 8(6):509–515, 1974.
- [9] R. L. HUGHES : the Flow of Human Crowds. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35(1):169–182, 2003.
- [10] A. KAMPHUIS et M. H. OVERMARS : Finding paths for coherent groups using clearance. *In Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH Eurographics symposium on Computer animation SCA 04*, p. 19–28. Eurographics Association, 2004.
- [11] M. KAPADIA, M. WANG, G. REINMAN et P. FALOUTSOS : Improved benchmarking for steering algorithms. *In Motion in Games*, p. 266–277. Springer, 2011.
- [12] M. MOUSSAÏD, D. HELBING et G. THERAULAZ : How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(17):1–5, 2011.
- [13] D. NIEUWENHUISEN, A. KAMPHUIS et M. H. OVERMARS : High quality navigation in computer games. *Science of Computer Programming*, 67 (1):91–104, 2007.
- [14] J. ONDREJ, J. PETTRÉ, A.-H. OLIVIER et S. DONIKIAN : A synthetic-vision based steering approach for crowd simulation. *ACM Transactions on Graphics*, 29(4):1, 2010.
- [15] J. PETTRÉ, J. ONDREJ, A.-h. OLIVIER, A. CRETUAL et S. DONIKIAN : Experiment-based modeling, simulation and validation of interactions between virtual walkers. *interactions*, 2009:189, 2009.
- [16] C. REYNOLDS : Interaction with Groups of Autonomous Characters. *Group*, 21(4):449–460, 2000.
- [17] T. ROUGHGARDEN : *Selfish routing*. Thèse de doctorat, Cornell University, 2002.
- [18] W. SHAO et D. TERZOPOULOS : Autonomous pedestrians. *Graphical Models*, 69(5-6):246–274, 2007.
- [19] B. S. SINGH, M. KAPADIA, P. FALOUTSOS et G. REINMAN : SteerBench : a benchmark suite for evaluating steering behaviors. *Computer Animation And Virtual Worlds*, 20(February):533–548, 2009.
- [20] A. TREUILLE, S. COOPER et Z. POPOVIĆ : Continuum crowds. *ACM Transactions on Graphics*, 25 (3):1160, 2006.
- [21] J. VAN DEN BERG et D. MANOCHA : Reciprocal Velocity Obstacles for real-time multi-agent navigation. *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 1928–1935, 2008.
- [22] G. K. ZIPF : *Human behavior and the principle of least effort : An introduction to human ecology*, vol. 47. Addison-Wesley Press, 1949.

4. <http://www.terradynamica.com/>

- [23] M. ZUKERMAN : Introduction to Queueing Theory and Stochastic Teletraffic Models. *Class Notes*, p. 1–218, 2008.