



HAL
open science

Simulation crédible des déplacements de piétons en temps réel : modèle microscopique à influence macroscopique

Patrick Simo Kanmeugne

► **To cite this version:**

Patrick Simo Kanmeugne. Simulation crédible des déplacements de piétons en temps réel : modèle microscopique à influence macroscopique. Autre [cs.OH]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2014. Français. NNT : 2014PA066597 . tel-01142081

HAL Id: tel-01142081

<https://theses.hal.science/tel-01142081>

Submitted on 14 Apr 2015

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.



THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

spécialité **Informatique**

École Doctorale Informatique, Télécommunications et Électronique (Paris)

Présentée par

Patrick **SIMO KANMEUGNE**

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Sujet de la thèse :

Simulation crédible des déplacements de piétons en temps réel :
modèle microscopique à influence macroscopique

Soutenance prévue en Juillet 2014

Devant le jury composé de :

Amal	EL FALLAH SEGHROUCHNI	Professeur, UPMC	Directrice de thèse
René	MANDIAU	Professeur, LAMIH	Rapporteur
Olivier	SIMONIN	Professeur, INSA	Rapporteur
Nicolas	BREDÈCHE	Professeur, UPMC	Examineur
Jean-Daniel	ZUCKER	Directeur de Recherche, IRD	Examineur
Salima	HASSAS	Professeur, LIRIS	Examinatrice
Aurélie	BEYNIER	Maître de Conférences, UPMC	Encadrante
Jean-Yves	DONNART	Responsable Études Avancées, THALES	Encadrant

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche et de développement qui vise à mettre en place des technologies de simulation permettant de reproduire des comportements humains dans une ville. L'objectif de nos travaux est de définir des algorithmes permettant de simuler les déplacements d'une grande quantité de piétons dans un environnement urbain, en temps réel, et de manière crédible. Pour ce type d'exercice, plusieurs solutions existent. Ces solutions sont principalement développées à partir de deux types d'approches : les approches microscopiques, où les piétons sont modélisés comme des agents autonomes, et les approches macroscopiques, où les piétons sont considérés comme soumis à des lois d'écoulement continues ou discrètes. Notre position est que ces deux approches ne s'opposent pas, contrairement à ce qui ressort de la pratique courante, mais se complètent mutuellement. Privilégier l'une au détriment de l'autre fait courir le risque de produire des solutions partiellement satisfaisantes. Aussi nous sommes nous proposés de clarifier le cadre formel permettant d'appréhender la complexité des déplacements.

En ligne avec plusieurs études statistiques et psychologiques sur le déplacement des piétons, nous explicitons un déplacement crédible comme un déplacement économe en énergie métabolique. Nous nous inspirons des jeux de congestion et du paradigme multi-agent pour proposer une formulation générique du problème de déplacement des piétons : nous introduisons la notion de ressources de navigation, que nous décrivons comme des régions de l'espace que les agents utilisent pour atteindre leurs destinations, et via lesquelles les agents interagissent pour estimer leurs dépenses énergétiques de manière robuste. Nous proposons une stratégie de déplacement basée sur les heuristiques taboues et nous considérons le principe influence et réaction pour implémenter les actions de déplacements.

Le concept d'environnement issu du paradigme multi-agent s'avère particulièrement utile pour appréhender la complexité de la simulation. L'environnement est considéré comme un composant indépendant et ontologiquement différent des agents qui est pris en compte à tous les niveaux de décisions. Une importante partie de la dynamique de la simulation peut ainsi être déléguée à l'environnement sans altérer l'autonomie des agents. Cette séparation favorise à la fois la crédibilité des résultats et le passage à l'échelle.

Nous avons choisi de comparer notre proposition avec un modèle microscopique standard à travers plusieurs scénarios de simulation. Il ressort de notre comparaison que notre

modèle permet de reproduire des résultats plus crédibles du point de vue d'un observateur extérieur et plus proches des études empiriques connues sur les déplacements des piétons.

Mots-clés: simulation comportementale, temps réel, passage à l'échelle, systèmes multi-agents, jeux de congestion, planification dynamique, interactions, crédibilité.

Sommaire

Chapitre 1

Simuler la vie dans la ville

1.1	Contexte de la thèse : le projet Terra Dynamica	2
1.2	Présentation de la problématique : crédibilité et passage à l'échelle	5
1.3	Plan du document	8

Chapitre 2

Étude du déplacement des piétons en milieu urbain

2.1	Biomécanique	10
2.2	Propriétés dynamiques	11
2.2.1	L'effet sablier	13
2.2.2	L'effet accordéon	14
2.2.3	Les phénomènes d'agrégation : formation de groupes et formation de files	15
2.2.4	Les effets de bord	16
2.3	Psychologie du déplacement en milieu urbain	16
2.4	Synthèse : le principe du moindre effort et la dépense énergétique	19
2.5	Retour sur la problématique : crédibilité et passage à l'échelle	21

Chapitre 3

Modélisation des déplacements de piétons

3.1	Les niveaux de décision	24
3.2	Les modèles macroscopiques	27
3.2.1	Analogie avec la dynamique des particules	27
3.2.2	Automates cellulaires	28
3.3	Les modèles microscopiques	29

3.3.1	Les modèles à base de forces sociales	31
3.3.2	Les modèles de «steering»	32
3.3.3	Les modèles géométriques	32
3.4	Les modèles hybrides	35
3.5	Apport des systèmes multi-agents pour la simulation des déplacements . .	38
3.5.1	L’environnement comme une abstraction de première classe	39
3.5.2	Le principe Influence / Réaction	41
3.5.3	Systèmes multi-agents et théorie de l’utilité	45
3.6	Introduction de notre approche : modèle microscopique à influence macro- scopique	48

Chapitre 4

Modèle Microscopique à Influence Macroscopique (MIM)

4.1	Principe du moindre effort	52
4.2	Formulation du problème	53
4.2.1	Mesures dynamiques	55
4.2.2	Introduction au module de trafic et aux interactions entre agents . .	56
4.2.3	Déplacement de ressource en ressource : introduction au moteur physique	58
4.3	Présentation schématique du modèle	60
4.3.1	Influence et réaction	60
4.3.2	Module de trafic	61
4.4	Heuristique de mise à jour dynamique d’itinéraire	64
4.4.1	Principe général des méthodes taboues	66
4.4.2	Notre proposition	68
4.4.3	Exemple d’exécution	73
4.5	Synthèse : potentiel du modèle MIM	79

Chapitre 5

Évaluation

5.1	Mise en place du modèle MIM	83
5.2	Paramétrage de la simulation	85
5.3	Évaluation non experte	86
5.3.1	Questionnaire d’évaluation non experte	88
5.3.2	Analyse des résultats du questionnaire	90

5.3.3	Conclusion de l'évaluation non experte	95
5.4	Évaluation experte	96
5.4.1	Rendu visuel et dépense énergétique	97
5.4.2	Performances computationnelles	104
5.5	Synthèse de l'évaluation	108

Chapitre 6

Intégration dans la plate-forme Terra Dynamica

6.1	Présentation générale des choix technologiques	112
6.1.1	Espace Navigable	113
6.1.2	Navigation bas niveau	116
6.2	Prise en compte de la sémantique	117
6.3	Synthèse de l'intégration	119

Chapitre 7

Conclusions et Perspectives

7.1	Résumé de la contribution scientifique de la thèse	122
7.2	Amélioration du modèle MIM	124
7.2.1	Modélisation de comportements spécifiques de groupe	124
7.2.2	Prise en compte de la dangerosité du trafic grâce à un module sé- mantique	125
7.2.3	Agrégation de ressources	125
7.2.4	Prise en compte des infrastructures d'écoulement de trafic	125

Annexe A

Développement du modèle MIM

A.1	Présentation de la bibliothèque RVOLib	131
A.2	Modèle MIM	132
A.2.1	Modélisation d'un agent	134
A.2.2	Modélisation de l'environnement	135
A.2.3	Utilisation de RVOLib	135

Bibliographie

139

1 Simuler la vie dans la ville

En informatique, la modélisation numérique d'environnements urbains est un exercice courant depuis maintenant plusieurs années (Moslah *et al.*, 2008). Le contemporain du monde numérique peut témoigner de la prolifération d'offres technologiques issues de projets de recherche et de développement, et destinées à des maîtres d'ouvrage, des opérateurs urbains ou à des fabricants de logiciels d'animation. Cet engouement coïncide, d'une part, avec des améliorations toujours plus significatives de l'outil informatique — en termes de performances de calcul, de capacités de stockage et de support de visualisation — et d'autre part, avec des avancées théoriques importantes dans l'analyse et la compréhension du comportement humain. Ainsi débouche-t-il sur de nouvelles perspectives qui vont au delà d'une simple production de données numériques permettant de représenter virtuellement les bâtiments et les infrastructures d'une ville : *simuler la vie dans la ville* devient possible et de plus en plus fréquent (Bandi et Thalmann, 2000; Aubel *et al.*, 2002; Tecchia *et al.*, 2001; Thalmann et Ulicny, 2002; Tecchia *et al.*, 2002; Moulin *et al.*, 2003; Shao et Terzopoulos, 2005; Pettre *et al.*, 2005; Yersin *et al.*, 2008; Thalmann *et al.*, 2009). Il s'agit d'une perspective intéressante pour la recherche, puisqu'elle ouvre un champ d'applications très vaste en faveur de l'adaptation des technologies numériques au service de l'homme et de son épanouissement.

Sommaire

1.1	Contexte de la thèse : le projet Terra Dynamica	2
1.2	Présentation de la problématique : crédibilité et passage à l'échelle	5
1.3	Plan du document	8

1.1 Contexte de la thèse : le projet Terra Dynamica

Développer des outils de simulation permettant d’immerger un opérateur dans un environnement urbain, mettre en scène des situations courantes, anticiper des phénomènes ou valider des hypothèses, telles sont les principales thématiques qui permettent de circonscrire le travail de thèse que nous présentons dans ce document. Ce travail s’inscrit dans le cadre d’un projet de recherche et développement, Terra Dynamica¹, dont le but est de développer un moteur de simulation à partir d’une étude attentive des phénomènes et caractéristiques dynamiques de la ville. Le projet Terra Dynamica fait suite à un autre projet du même type, Terra Numerica², dont le but était de mettre en place des technologies visant à numériser des villes en 3D (bâtiments, chaussées, végétation — voir figure 1.1) et à les représenter sur différents supports multimédia (réalité virtuelle, réalité augmentée, service en ligne, téléphonie mobile).

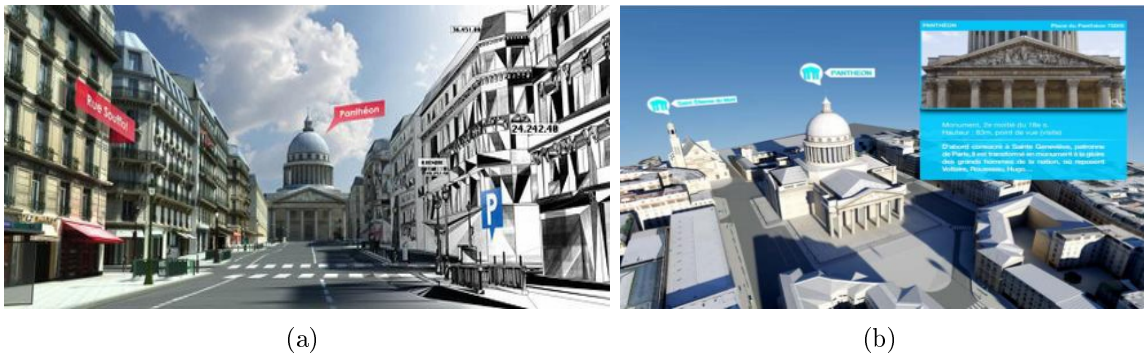


FIGURE 1.1 – Illustrations des travaux de Terra Numerica - Virtualisation du Quartier Soufflot Paris 5^e

D’un point de vue technique, la démarche de travail adoptée au sein du projet Terra

1. www.terradynamica.com : projet soutenu et labellisé par les pôles de compétitivité Cap Digital et Advancity, et sélectionné par le Fonds Unique Interministériel 8, ce projet collaboratif regroupe de nombreux partenaires industriels et académiques, en particulier THALES Training & Simulation et l’UPMC (équipe Systèmes Multi-Agents du Laboratoire d’Informatique de Paris 6).

2. www.terranumerica.com.

Dynamica a été d'enrichir un corpus de solutions existantes en intégrant les fonctionnalités spécifiques à un moteur de simulation comportementale — les principaux enjeux techniques étant ici de fournir un moteur de simulation capable de gérer simultanément une grande quantité d'acteurs. Parmi ces fonctionnalités, nous pouvons citer : *représenter dynamiquement des piétons réalisant leurs activités courantes et interagissant entre eux de manière **crédible*** ; *représenter dynamiquement des véhicules évoluant sur un réseau routier* ; *modifier dynamiquement le cours d'une simulation et mettre en place des scénarios personnalisés* ; *sonoriser la simulation de manière réaliste*.

D'un point de vue scientifique, il a été question de motiver les choix techniques par une étude objective du comportement humain et de fournir des garanties sur la fiabilité des solutions développées. En effet, à côté des moyens techniques à déployer pour la mise en œuvre d'un tel outil, il est nécessaire de répondre à plusieurs questions fondamentales qui se posent en amont. Parmi elles, nous pouvons citer : *Comment représenter une activité, un comportement ? Comment traduire formellement la notion de crédibilité ? Comment reproduire les comportements des êtres humains de manière crédible ? Comment évaluer objectivement la crédibilité d'un comportement afin de garantir une simulation exploitable ? Comment présenter la sortie d'une simulation comportementale en temps réel ?*

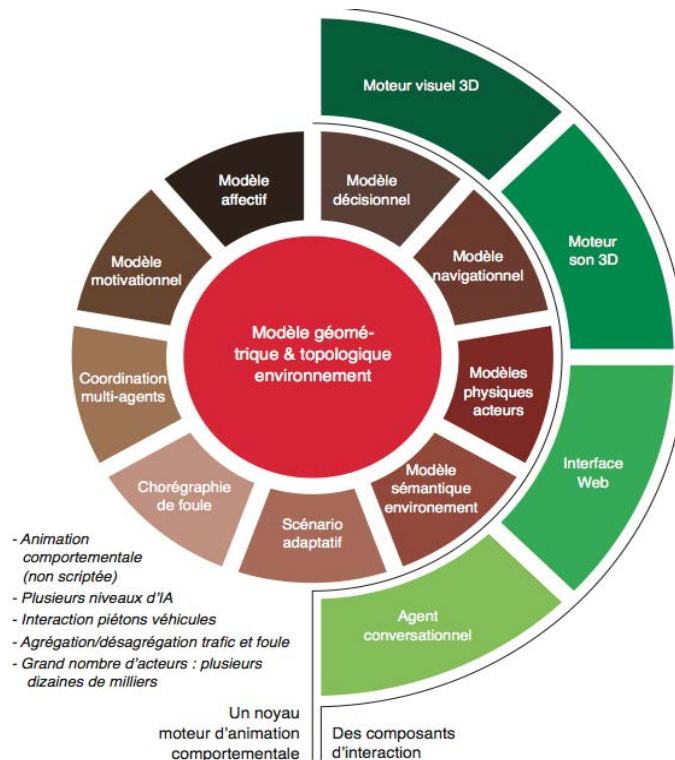


FIGURE 1.2 – Présentation du moteur de simulation comportemental

La figure 1.2 représente la structure du noyau du moteur de simulation comportemental

tale et regroupe les différentes contributions identifiées. Nous évoquons ici celles qui ont fait l'objet d'un travail scientifique spécifique (nous renvoyons le lecteur aux communications scientifiques correspondantes pour plus de détails) :

- **Modèle sémantique, environnement** : regroupe les outils permettant de modéliser l'information sémantique de l'environnement et de raisonner sur ces informations en temps réel (Harkouken-Saiah *et al.*, 2012).
- **Scénarisation adaptative** : regroupe les outils permettant de construire des scénarios capables d'évoluer en fonction du comportement des acteurs de la simulation et des actions des utilisateurs le cas échéant (Chauvin *et al.*, 2014).
- **Modèle affectif** : regroupe les outils permettant de doter certains acteurs de motivations et d'émotions les rendant capables de générer automatiquement leurs objectifs (Campano *et al.*, 2013).
- **Modèle décisionnel et modèle motivationnel** : regroupe les outils permettant de doter les acteurs de comportements cognitifs (afin qu'ils puissent mettre en œuvre des plans d'actions ou acquérir des connaissances) et de comportements réactifs (pour qu'ils puissent réagir aux différentes situations rencontrées) (Reynaud *et al.*, 2012).
- **Coordination multi-agents** : regroupe les outils permettant de simuler des groupes de personnages ayant des buts communs dans une ville. Par exemple : des services de secours, des unités de police patrouillant une zone, des pompiers répartissant leurs forces entre plusieurs incendies, des services d'ambulances cherchant à acheminer de nombreux blessés vers plusieurs hôpitaux. (Poulet *et al.*, 2012).
- **Modèle navigationnel ou d'«Intelligence Artificielle Bas-Niveau»** : regroupe les outils permettant aux acteurs de se déplacer dans les rues, les bâtiments et les souterrains de manière crédible (Simo Kanmeugne et Beynier, 2014; Simo Kanmeugne *et al.*, 2013).

Notre rôle au sein de ce projet était de définir des algorithmes permettant de reproduire les déplacements d'une grande quantité de piétons **en temps réel** et de **manière crédible**. Nous avons donc en charge le développement du module d'«**Intelligence Artificielle Bas-Niveau**». Comme nous le verrons, les dimensions techniques et scientifiques ont été omniprésentes dans nos travaux et ont conjointement influencé les orientations que nous avons prises. Dès le début de nos travaux, en effet, nous avons eu à développer des algorithmes de déplacements fonctionnels. Il était question de les faire évoluer tout au long du projet pour arriver, à terme, à un modèle de déplacement intégré dans le moteur de simulation et pleinement satisfaisant.

Dans la section suivante, nous présentons le contexte dans lequel prend forme notre

travail et la problématique principale que nous retenons pour orienter nos réflexions. Nous détaillerons ensuite le plan général du document.

1.2 Présentation de la problématique : crédibilité et passage à l'échelle

Reproduire le déplacement d'entités mobiles (agents virtuels, robots, etc.) est un exercice très courant en intelligence artificielle (Latombe, 1991; Reese et Stout, 1999; LaValle, 2006). De nombreuses bibliothèques de programmation téléchargeables en ligne (Recast-Navigation, FreeFem, OpenSteer, RVOlib, Bullet Physics, Box2D, etc.) proposent des solutions techniques permettant de simuler des comportements de navigation de plusieurs entités mobiles en temps réel. La méthodologie généralement admise dans le domaine décompose l'exercice en trois étapes (Reese et Stout, 1999; Dapper *et al.*, 2007) :

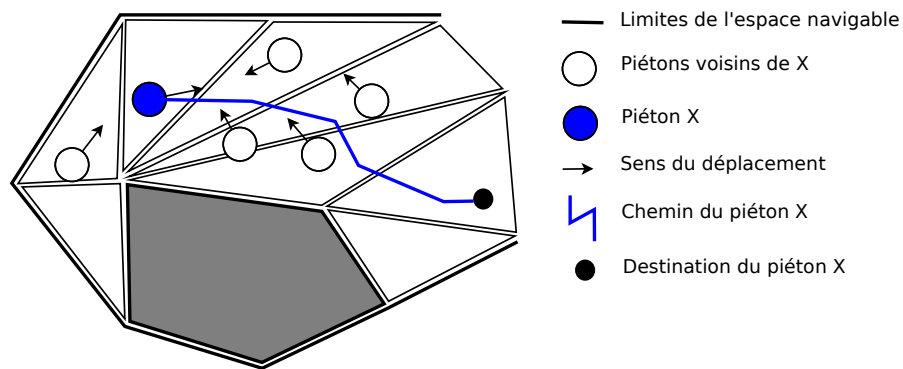
1. **La représentation de l'espace navigable**, c'est-à-dire de l'espace dans lequel ont lieu les déplacements des entités mobiles.
2. **La recherche de chemin**, qui consiste à chercher la «meilleure» succession de «*points de passage*» entre deux positions données dans l'espace navigable.
3. **Le suivi de chemin** et la **coordination**, qui consiste à construire dynamiquement une trajectoire passant par ces «points de passage» tout en évitant les collisions, en se coordonnant avec les entités mobiles et en prenant en compte les objets statiques de l'environnement.

En nous inspirant des algorithmes de coordination (Fiorini et Shiller, 1998; Reynolds, 2000; Helbing *et al.*, 2001) et de planification de chemin existants (Nilsson, 1991; LaValle, 2006), ainsi que des travaux proposant des modèles compacts pour la représentation d'un espace navigable (Samet, 1988; Shao et Terzopoulos, 2005; Pettre *et al.*, 2005; Yersin *et al.*, 2005; Lamarche, 2009), nous nous sommes orientés d'emblée vers la mise en place d'un module de navigation en nous basant sur une approche *microscopique* (nous reviendrons sur cette terminologie dans le chapitre 3). Une telle approche, souvent présentée comme la plus intuitive et la plus intelligible (Shao et Terzopoulos, 2007), consiste fondamentalement à modéliser le piéton comme un *agent autonome*, évoluant sur une surface navigable représentée par un réseau de mailles contiguës³ et générée à partir des données provenant par exemple d'un système d'information géographique⁴. Le comportement de l'agent consiste à faire évoluer sa position en temps réel jusqu'à une destination — définie

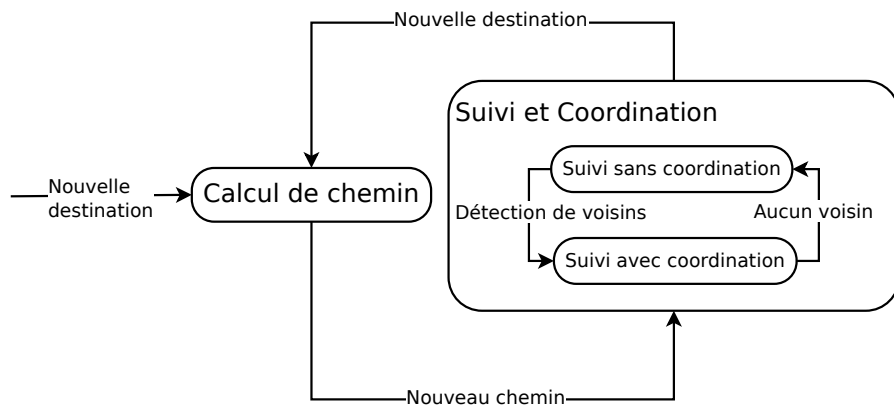
3. Communément appelé NavMesh.

4. En abrégé, S.I.G, ou encore G.I.S (abréviation anglophone pour «Geographic Information System»).

de manière exogène — tout en se coordonnant avec ses voisins les plus proches. Les éléments descriptifs du comportement d'un agent quelconque sont alors définis comme l'indique la figure 1.3(a) : l'espace navigable est illustré par l'ensemble des triangles et les agents sont représentés par des cercles. La figure 1.3(b) représente le diagramme d'activités synthétique d'un agent : l'activité « *Calcul de chemin* » exploite l'espace navigable et l'activité « *Suivi et Coordination* » nécessite la prise en compte des agents situés dans le voisinage.



(a) Éléments descriptifs du comportement d'un piéton X



(b) Diagramme d'activités synthétique

FIGURE 1.3 — Illustrations des éléments descriptifs du comportement d'un agent X (a) et schéma du diagramme d'activités minimal. Les mailles contiguës sont de forme triangulaire et représentent l'espace navigable.

Les approches microscopiques posent une **problématique** particulièrement handicapante pour la simulation d'un **nombre variable d'agents** : suivant ce type d'approches, la mise en œuvre du comportement repose en grande partie sur la coordination des déplace-

ments et sur l'articulation entre coordination et suivi de chemin ; seulement, la coordination devient de plus en plus coûteuse en ressources de calcul et très souvent incompatible avec le suivi de chemin (Treuille *et al.*, 2006) lorsque la densité d'agents augmente — ces approches passent donc difficilement l'échelle du nombre d'agents et peinent à reproduire les phénomènes observables dans ces situations (Simo Kanmeugne et Beynier, 2014), comme la formation de files, la formation de groupe, les goulots d'étranglement à l'entrée d'un passage étroit, etc. (cf. chapitre 2).

Pour améliorer la crédibilité des comportements produits et les performances computationnelles, une pratique courante est alors de remplacer les mécanismes de coordination par des processus qui s'inspirent d'observations empiriques — exemple : en introduisant des techniques de planification ou de suivi de chemin permettant d'éviter les zones denses (Karamouzas *et al.*, 2009; Saboia et Goldenstein, 2012), en dirigeant ponctuellement les déplacements de piétons par des champs de forces (Patil *et al.*, 2010), etc. Ces dispositions favorisent l'économie des ressources de calcul et fluidifient le rendu graphique ; mais elles interpellent, en revanche, sur la fiabilité des simulations. En effet, bien qu'il soit légitime de s'inspirer des propriétés empiriques du déplacement de piétons pour la modélisation, il faut garder à l'esprit que ces propriétés sont surtout des éléments de validation. Par exemple, le fait que des agents évitent les zones denses constitue un élément de crédibilité pour une simulation — dans la réalité, les piétons évitent effectivement les zones denses. Mais observer que les piétons évitent les zones denses ne justifie pas nécessairement qu'une action ou un plan d'actions visant explicitement à « *éviter les zones denses* » soit définie dans le comportement des agents. De manière plus synthétique, assimiler les actions des agents aux effets observés de ces actions dans l'environnement fait courir le risque de limiter l'expressivité des modèles, de réduire leurs capacités à prédire des phénomènes réels, à anticiper/valider des hypothèses, etc.

Partant de ce constat, nous nous sommes proposé de définir un modèle générique de déplacement de piétons en temps réel. Nous nous intéressons à des espaces potentiellement très denses et très dynamiques, i.e. des espaces dans lesquels le nombre de piétons est susceptible d'augmenter ou de diminuer très rapidement. Nous évaluerons la crédibilité de notre modèle suivant sa capacité à reproduire des comportements émergents, non seulement convaincants du point de vue d'un observateur quelconque, mais aussi conformes aux observations effectuées dans la réalité. Pour mener à bien nos travaux, nous clarifions dans un premier temps la notion de crédibilité et étudions en profondeur la nature des influences réciproques qui s'exercent entre les piétons lorsqu'ils se déplacent. Cette première étude nous permet de définir le cadre formel permettant d'appréhender la complexité du comportement de navigation. Dans un second temps, nous étudions les

meilleurs outils pour la mise en œuvre des déplacements suivant ce cadre formel. Nous exploitons le paradigme multi-agents (Wooldridge, 2002; Shoham et Leyton-brown, 2009), notamment le concept d'« environnement » (Weyns *et al.*, 2006; Ferber et Müller, 1996; Michel, 2007), et nous introduisons des algorithmes de planification dynamique adaptés au temps réel (Glover et Laguna, 1997; Casali *et al.*, 2007).

1.3 Plan du document

Le plan général du document se présente comme suit.

Dans le **chapitre 2**, après avoir étudié des données empiriques sur le déplacement des piétons en milieu urbain, nous proposons une définition objective de la crédibilité d'un déplacement entre deux points.

Dans le **chapitre 3**, nous dressons un état de l'art sur les modèles de déplacements de piétons en temps réel. À la fin de ce chapitre, nous discuterons des éléments de modélisation sous-exploités dans les travaux existants et nous insisterons sur l'importance du paradigme multi-agents pour la simulation des déplacements d'un nombre variable d'acteurs.

Dans le **chapitre 4**, nous présentons en détail notre contribution pour la modélisation du déplacement de piéton en milieu urbain. Il s'agit d'un modèle de couplage entre la dynamique microscopique du déplacement d'un piéton et la dynamique macroscopique de l'écoulement du trafic piéton. Nous expliquerons en quoi consiste ces deux dynamiques.

Dans le **chapitre 5**, nous décrivons l'ensemble des évaluations qui ont été réalisées. Elles sont principalement de deux types : une évaluation auprès d'utilisateurs non experts et une évaluation experte. Pour réaliser cette évaluation, nous nous comparons avec un modèle existant sur plusieurs scénarios de simulation.

Dans le **chapitre 6**, nous revenons sur les grandes lignes de notre apport pour le projet Terra Dynamica, et dans le **chapitre 7**, nous présentons quelques perspectives pour notre travail de recherche.

2 Étude du déplacement des piétons en milieu urbain

Notre travail nous a naturellement amené à nous intéresser à différentes études empiriques sur le déplacement des piétons, en général, et sur la navigation des piétons en milieu urbain en particulier. Dans ce chapitre, nous proposons un résumé non exhaustif des résultats de ces études organisé en trois points : l'analyse biomécanique des déplacements de piétons (section 2.1), la dynamique des déplacements de piétons (section 2.2) et la psychologie du déplacement des piétons en milieu urbain (section 2.3). Nous proposons, en synthèse, une réflexion sur l'économie de l'effort (section 2.4) en tant qu'élément de modélisation essentiel pour reproduire les déplacements des piétons dans toute leur complexité. Pour conclure ce chapitre, nous revenons sur la problématique de notre travail de manière plus formelle en explicitant la notion de crédibilité (section 2.5).

Sommaire

2.1	Biomécanique	10
2.2	Propriétés dynamiques	11
2.2.1	L'effet sablier	13
2.2.2	L'effet accordéon	14
2.2.3	Les phénomènes d'agrégation : formation de groupes et formation de files	15
2.2.4	Les effets de bord	16
2.3	Psychologie du déplacement en milieu urbain	16
2.4	Synthèse : le principe du moindre effort et la dépense énergétique	19
2.5	Retour sur la problématique : crédibilité et passage à l'échelle	21

2.1 Biomécanique

Le piéton interagit et s'adapte à l'environnement dans lequel il se déplace (Goffman, 1972; Golledge, 1992, 1995, 1997). Le déplacement étant lui-même un mouvement continu du corps dans l'espace et dans le temps, que le piéton corrige à partir de sa propre perception et de ses capacités motrices (Loomis *et al.*, 1992), la prise en compte de la dimension biomécanique du déplacement est légitime pour la modélisation. Cela est vrai en particulier lorsque les modèles sont conçus pour l'animation comportementale ou pour la prédiction de comportements — les capacités perceptives et motrices sont naturellement limitées chez un piéton et ces limites ont des conséquences immédiates sur son déplacement.

Brogan et Johnson (2003) analysent les effets de l'inertie, de la position des obstacles et de la topologie des virages sur la trajectoire d'un piéton. Grâce à des enregistrements effectués sur de vrais piétons en situation réelle, leurs travaux permettent de déterminer quantitativement des contraintes cinématiques réalistes qui s'appliquent au déplacement. Ces contraintes concernent, par exemple, la vitesse de déplacement, la vitesse de rotation, la variation de la vitesse au départ d'une position, ou encore, la décélération à l'approche d'un point d'arrêt.

Cutting *et al.* (1992) étudient l'importance de l'œil dans l'élaboration du déplacement chez les piétons. Les travaux de Cutting *et al.* font en particulier ressortir le rôle essentiel de la rétine dans la perception de l'environnement, des objets statiques et des objets

mobiles (Cutting *et al.*, 1992; Vishton et Cutting, 1995; Vishton *et al.*, 1995; Cutting, 1997; Cutting *et al.*, 1999; Cutting et Readinger, 2002). Les informations qui transitent par cet organe proviennent de plusieurs sources — occlusion visuelle, taille relative des objets, mouvement relatif des objets, densité, etc. — et permettent aux piétons, entre autre, d’élaborer des stratégies d’évitement de collisions dans un environnement plus ou moins encombré.

S’inspirant des travaux de Vishton et Cutting (1995), Pettré *et al.* (2009) puis Olivier *et al.* (2012) analysent de près la manière dont deux piétons adaptent leur déplacement pour éviter une collision et le rôle de chacun des protagonistes dans le processus d’évitement. Les auteurs retiennent trois phases dans ce processus — observation, réaction et régulation — et argumentent que les stratégies d’adaptation de chacun des protagonistes sont fonction de la manière dont ils perçoivent l’imminence de la collision.

Jelić *et al.* (2012) s’intéressent à la synchronisation des pas pendant la marche pour des piétons se déplaçant le long d’une ligne. À partir d’expérimentations réalisées en laboratoire, Jelić *et al.* concluent que l’amplitude du pas est proportionnelle à la vitesse de déplacement du piéton et de l’espace disponible devant lui. Les auteurs proposent ensuite plusieurs diagrammes fondamentaux traduisant les différentes dépendances entre variables (« vitesse »-« densité », « vitesse »-« amplitude du pas », « amplitude du pas »-« espace disponible »).

L’analyse des capacités perceptives et motrices permet de rendre compte des facultés et des limites biomécaniques naturelles chez les piétons. Cependant, la plupart des auteurs de ces études reconnaissent que le comportement de navigation d’un piéton ne se déduit pas uniquement de ses paramètres biomécaniques (Sun et Metaxas, 2001; Brogan et Johnson, 2003). Il est nécessaire de comprendre également comment ces paramètres interagissent entre eux pour la réalisation d’un objectif donné (Sun et Metaxas, 2001).

2.2 Propriétés dynamiques

Suivant le niveau d’encombrement de l’espace dans lequel ils évoluent, les piétons se déplacent de manière plus ou moins stéréotypée (Helbing *et al.*, 2001). Comme le soulignent plusieurs études (Fruin, 1971; Helbing *et al.*, 2001; Seyfried *et al.*, 2005; Hoogendoorn, 2005; Daamen et Hoogendoorn, 2007; Schadschneider *et al.*, 2008; Hoogendoorn *et al.*, 2011), la vitesse de déplacement des piétons semble être inversement proportionnelle au niveau de congestion⁵. Pour traduire cette dépendance et ses différentes conséquences sur l’écoulement du trafic piéton, Fruin introduit le concept de **niveau de service** — *Level*

5. Dans ce document les termes *encombrement* et *congestion* sont interchangeables.

Of Service (LOS) (Fruin, 1971). Les niveaux de service caractérisent la qualité du trafic sur une surface navigable en fonction de son niveau de congestion. À partir d’observations empiriques, Fruin définit différents niveaux de service sur une échelle allant de *A* à *F* (voir tableau 2.1 et figure 2.1). Toute surface peut ainsi se voir attribuer un niveau en fonction de sa superficie et de sa densité. La valeur du niveau permet par exemple de prédire la vitesse de déplacement des piétons évoluant sur cette surface.

Tableau 2.1 – Mesures correspondant à chaque niveau de service (Fruin, 1971). p : piéton ; min : minutes ; m : mètre ; s : secondes

LoS	Densité(p/m^2)	Espace(m^2/p)	Débit (p/min)	Vitesse (m/s)
LoS A	≤ 0.27	≥ 3.24	≤ 23	≥ 1.3
LoS B	entre 0.31 et 0.43	entre 2.32 et 3.24	entre 23 et 33	1.27
LoS C	entre 0.43 et 0.72	entre 1.39 et 2.32	entre 33 et 49	1.22
LoS D	entre 0.72 et 1.08	entre 0.93 et 1.39	entre 49 et 66	1.14
LoS E	entre 1.08 et 2.17	entre 0.46 et 0.93	entre 66 et 82	0.76
LoS F	> 2.17	≤ 0.46	variable	≤ 0.76

Conceptuellement, les niveaux de service de Fruin s’avèrent d’une grande importance pour l’aménagement et pour la simulation. En effet, ils permettent de définir des mesures de qualité et des exigences pour la construction d’infrastructures de navigation, et constituent en même temps un outil de prédiction d’écoulement du trafic. Même si la distinction entre les différents niveaux reste discutable, les travaux de Fruin permettent de prédire certains *phénomènes d’écoulement* observables dans les espaces congestionnés (voir (Still, 2000) pour une analyse critique) comme l’*effet accordéon* que nous décrivons dans la section 2.2.2.

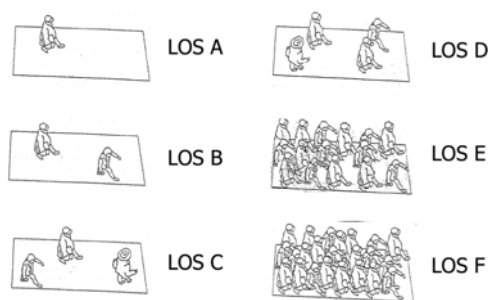


FIGURE 2.1 – Niveaux de service (Fruin, 1971)

À la suite de Fruin, plusieurs auteurs proposent d’étudier l’influence de la congestion sur le déplacement des piétons de manière empirique (Seyfried *et al.*, 2005; Hoogendoorn, 2005; Helbing *et al.*, 2001; Daamen et Hoogendoorn, 2007; Hoogendoorn *et al.*, 2011). Le fait que les déplacements de piétons soient systématiquement prévisibles pour certaines

configurations de l'espace navigable donne à ces études une double importance. Premièrement, elles peuvent servir de support pour la validation d'un modèle de déplacement. Un protocole de validation simple serait par exemple de mettre en scène une ou plusieurs de ces configurations et de vérifier que les résultats de la simulation correspondent aux études empiriques. Deuxièmement, elles donnent des intuitions sur la nature des influences qui s'exercent entre les piétons, ce qui permet de mettre en œuvre des modèles prédictifs.

Dans les paragraphes suivants, nous abordons en détails quelques uns de ces phénomènes. Dans la littérature, ils portent le nom d'*effets macroscopiques*, de *phénomènes émergents*, ou encore de *phénomènes d'auto-organisation*.

2.2.1 L'effet sablier

L'**effet sablier**⁶ s'observe lorsque le nombre de piétons arrivant dans un espace est supérieur à la capacité d'accueil de cet espace⁷. C'est la conséquence d'un simple principe d'exclusion suivant lequel l'espace occupé par un piéton ne peut être simultanément occupé par un autre (Schadschneider *et al.*, 2008). Plusieurs configurations topologiques, très courantes dans les espaces publics, sont favorables à l'occurrence de ces phénomènes — couloir (Daamen et Hoogendoorn, 2003; Hoogendoorn et Daamen, 2004) (voir figure 2.2(b)), portes de bus ou de métro (Zhang *et al.*, 2008), seuils d'escaliers, etc.

L'effet sablier est également un phénomène d'écoulement très étudié en physique des particules (Le Pennec, 1996; Staron *et al.*, 2012). Les déplacements de piétons dans les configurations citées ci-dessus présentent d'ailleurs de fortes similitudes avec l'écoulement de matériaux granulaires dans des conditions similaires (Helbing *et al.*, 2001).

Une variante de l'effet sablier s'observe lorsque deux groupes de piétons se trouvent de part et d'autre d'un passage étroit qu'ils essaient d'emprunter : le sens du passage oscille alors entre chacune des directions (Helbing *et al.*, 2001; Daamen et Hoogendoorn, 2003; Zhang *et al.*, 2008). Cela peut s'expliquer par le fait que lorsqu'un piéton est à même d'emprunter le passage dans une direction, il facilite la circulation pour ceux qui vont dans la même direction que lui, jusqu'à ce qu'un piéton se déplaçant dans la direction opposée passe à son tour (Schadschneider *et al.*, 2008) (voir figure 2.2(a)).

6. « Jamming », « Clogging » (Moussaid *et al.*, 2010; Schadschneider *et al.*, 2008), « Ticking Hourglass » (Helbing *et al.*, 2001), « Bottleneck » (Daamen et Hoogendoorn, 2003) effects.

7. Par capacité d'accueil d'un espace, nous entendons ici, le nombre maximal de piétons que peut contenir cet espace.



(a) Métro de Beijing (Zhang *et al.*, 2008)

(b) Expérimentations sur les phénomènes de goulot d'étranglement (Hoogendoorn et Daamen, 2004)

FIGURE 2.2 – Illustrations de l'effet sablier

2.2.2 L'effet accordéon

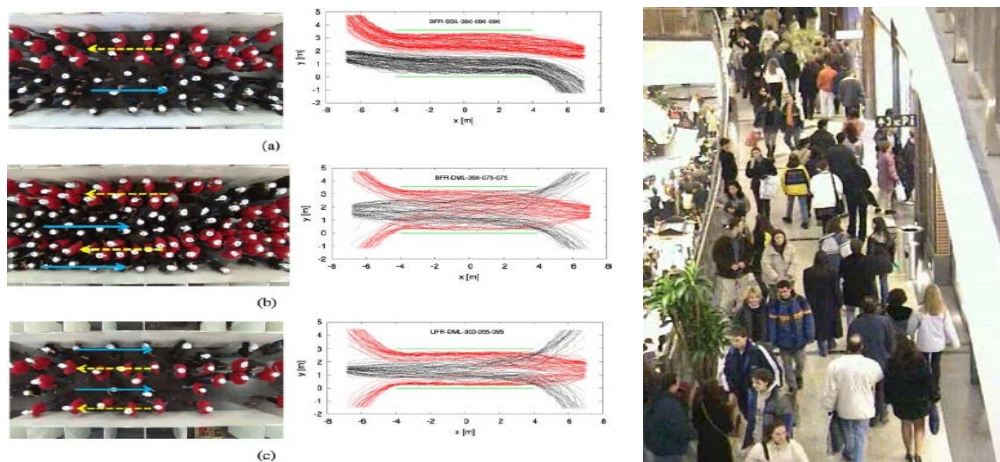
L'**effet accordéon**⁸ se caractérise par des variations quasi périodiques de la densité de piétons dans l'espace et dans le temps. Il s'observe lorsque plusieurs piétons se déplacent dans une même direction et que la congestion provoque régulièrement l'arrêt ou le ralentissement d'une partie du flux (Schadschneider *et al.*, 2008). Les piétons réagissent, en effet, très lentement au changement de régime et ne modifient leur vitesse que lorsque la collision devient imminente (Virkler et Elayadath, 1994) — c'est ce qui donne l'impression d'une onde de choc qui se propage dans le sens contraire du déplacement lorsque le mouvement est observé d'un œil extérieur. Les ondes de chocs produites peuvent dans ces situations être très violentes et surprendre les piétons qui y sont exposés, provoquant des accidents mortels comme l'histoire le montre (Helbing et Johansson, 2009; Helbing et Mukerji, 2012). Fruin reporte, à ce sujet, qu'« à partir d'une densité de 7 piétons par m^2 la foule se comporte pratiquement comme une masse de fluide, les variations de densité se propagent très rapidement à travers la foule, et peuvent aller jusqu'à projeter des corps sur plus de 3 mètres » (Fruin, 1993).

L'effet accordéon est bien connu des analystes du trafic automobile. Il s'observe lors des embouteillages ou à proximité des feux de circulation en fonctionnement. Dans le domaine du trafic piéton, les flux de voyageurs dans les couloirs de métro aux heures de pointe, les défilés de manifestants, ou encore, les processions de pèlerins, font partie des situations dans lesquelles ce phénomène est fréquent.

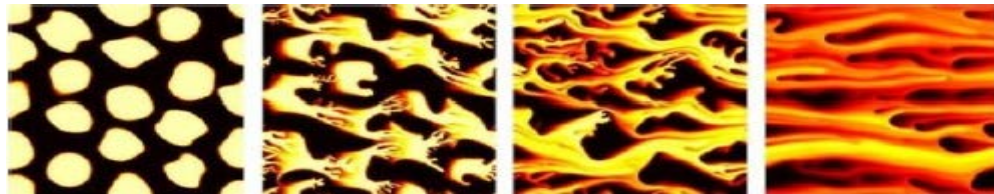
8. «Shockwave» (Helbing *et al.*, 2001), «Stop-and-go» (Moussaïd *et al.*, 2011; Schadschneider *et al.*, 2008; Portz et Seyfried, 2009), « Crowd compression », « Density waves » (Still, 2000) effects.

2.2.3 Les phénomènes d'agrégation : formation de groupes et formation de files

La formation de groupes et la formation de files sont des phénomènes d'agrégation⁹ qui s'observent majoritairement lorsque plusieurs piétons se déplacent dans des directions différentes. Suivant l'espace disponible et la vitesse de déplacement, il se forme des files unidirectionnelles ou des « bulles » de piétons qui leur permettent de se mouvoir de manière plus fluide (Kadanoff, 1985; Helbing *et al.*, 2001; Schadschneider *et al.*, 2008). Les piétons semblent se regrouper ou se suivre suivant la direction de leur déplacement pour minimiser les conflits avec ceux qui se déplacent dans une autre direction (Zhang *et al.*, 2012). Des phénomènes semblables sont également étudiés en physique des particules (voir figure 2.3(c)). Les agrégations en files y sont moins nettes que chez les piétons car les influences réciproques sont plus fortes et plus complexes chez ces derniers.



(a) Expérimentations sur la formation de files bidirectionnelles (Zhang *et al.*, 2008) (b) File bidirectionnelles dans un magasin (Helbing et Johansson, 2009)



(c) Simulation de phénomènes d'agrégation de particules (Jha *et al.*, 2010)

FIGURE 2.3 – Phénomènes d'agrégation

9. « Lane formation » (Moussaïd *et al.*, 2011; Helbing *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2012), « Fingering » (Still, 2000; Helbing *et al.*, 2001), « Freezing-by-heating » (Schadschneider *et al.*, 2008) effects.

2.2.4 Les effets de bord

Dans ses travaux sur la dynamique des déplacements de piétons, Still observe que pour un ensemble de piétons se déplaçant de façon groupée et dans une même direction, le mouvement est moins ample au centre du groupe qu'à la périphérie (Still, 2000). La description qu'il donne de ce phénomène s'apparente aux effets de bord¹⁰ étudiés en écologie (effet lisière) ou encore en thermodynamique. Still cite les quais d'embarquement dans les stations ferroviaires comme un lieu privilégié pour observer ce phénomène, notamment lorsqu'ils sont très congestionnés. Dans le même ordre d'idée, nous pouvons rajouter les trottoirs dans les centres des grandes agglomérations.

Les nombreuses analogies entre le déplacement des piétons, la dynamique des fluides et l'écoulement de particules solides font raisonnablement penser à une *économie de mouvement* similaire (Henderson, 1974). Rien d'étonnant, dès lors, à ce que les modèles de simulation de déplacement de piétons de la littérature s'inspirent, en grande partie, des modèles développés en physique de particules solides ou en dynamique de fluide. Cependant, ces analogies ne doivent pas éclipser la dimension psychologique importante de l'*agir* d'un piéton, ni sa grande liberté de mouvement. En effet, contrairement aux particules, les piétons ne sont pas soumis aux mêmes lois de conservation de mouvement (Henderson, 1974; Helbing et Johansson, 2009). Ils peuvent se fixer eux-mêmes des objectifs à atteindre, s'immobiliser et reprendre leur mouvement de manière quasi instantanée, ou encore, tenir compte de critères subjectifs dans l'exécution de leurs actions (Still, 2000).

2.3 Psychologie du déplacement en milieu urbain

Choisir une destination et sélectionner un chemin sont deux activités inhérentes au déplacement chez les êtres humains et concentrent, de ce fait, énormément d'attention dans le domaine des sciences cognitives (Golledge, 1995). Golledge (1992, 1995, 1997) présente une série de travaux visant à étudier ces deux activités d'un point de vue cognitif, afin de définir les critères suivant lesquels les piétons effectuent leurs choix et la manière dont ces critères évoluent avec les configurations de l'environnement. Golledge justifie sa démarche en argumentant que les modèles mathématiques communément utilisés pour simuler ces activités sont beaucoup trop normatifs et très éloignés des processus naturels de décision chez les êtres humains.

Dans une de ses expérimentations (en laboratoire), Golledge (1997) propose des exercices de navigation entre deux points et dans plusieurs configurations à des participants

10. « Edge » effect (Still, 2000).

Tableau 2.2 – Classification des critères de sélection de chemin du point de vue des piétons, tirée de (Golledge, 1997)

	Mean Rating of Criteria Used in Task	« Mean Ranking of criteria Usually Chosen »
Shortest Distance	4.2	4.4
Least Time	4.1	2.6
Fewest Turns	3.6	3.5
Most Scenic / æsthetic	3.5	1.9
First Noticed	2.5	4.3
Longest Leg First	2.3	2.3
Many Curves	2.3	1.6
Most Turns	1.8	2.7
Different from Previous	1.8	2.1
Shortest Leg First	1.7	3.4

volontaires (32 adultes au total, 16 hommes et 16 femmes). Les participants prenant part à l'expérience sont ensuite invités à indiquer le critère qu'ils ont utilisé pour sélectionner leur chemin. Parmi les réponses les plus fréquentes, la distance et le temps arrivent en première position (voir tableau 2.2).

Cependant, dans une deuxième phase de l'expérimentation, lorsque les participants sont invités à indiquer les critères qu'ils utilisent pour leurs déplacements ordinaires, l'ordre est tout autre et le temps ne fait plus partie des critères prioritaires. Les critères suivants sont les plus fréquents :

1. Le chemin le plus court en distance.
2. Le chemin le plus trivial : c'est-à-dire, celui qui demande le minimum de réflexion.
3. Le chemin le plus rectiligne : c'est-à-dire, celui qui présente le minimum de virages.
4. Le chemin qui présente l'entame la plus courte : lorsque les chemins se décomposent en plusieurs segments, il s'agit de celui dont les premiers segments sont les plus courts en terme de distance.

Golledge (1997) note plusieurs particularités concernant l'activité de recherche de chemin chez les piétons dans les situations ordinaires. Notamment, la recherche est guidée par très peu d'information (exemple : la direction dans laquelle se situe la destination) — l'espace de recherche est par conséquent très restreint. Ou encore, l'analyse de l'espace est sujette à plusieurs simplifications et à des erreurs d'appréciation dues à une faculté de perception limitée, etc. Tout ceci le porte à conclure que les piétons ne sélectionnent pas leur chemin suivant des critères normatifs tel que le temps et la distance (Golledge, 1997,

page 10). Les travaux de Helbing *et al.* (2001) confirment cette conclusion. Synthétisant une série d'observations empiriques, Helbing *et al.* émettent les hypothèses suivantes :

- Les piétons choisissent normalement le plus court chemin pour aller à leur destination. Si plusieurs alternatives de même longueur existent, les piétons préfèrent les chemins les plus rectilignes. Les piétons sont très réticents aux détours ou aux déplacements qui les éloignent physiquement de leur destination, même si ces déplacements leur permettent d'éviter la congestion.
- Les piétons se déplacent suivant une vitesse préférée individuelle — celle qui leur procure le confort maximum. Les vitesses préférées au sein d'une foule de piétons sont distribuées suivant une gaussienne de moyenne $1.34m.s^{-1}$ et d'écart type $0.26m.s^{-1}$.
- Les piétons maintiennent une certaine distance avec les autres piétons ainsi qu'avec les murs et autres obstacles présents dans l'environnement. Cette distance est inversement proportionnelle à la densité et peut être très faible si le piéton est pressé.

Toutes ces observations sur le déplacement des piétons laissent entrevoir quelques principes génériques de comportement que les psychologues du comportement humain regroupent sous le terme d'*économie du comportement* (Hull, 1943; Zipf, 1949). La notion d'*économie du comportement* est souvent évoquée pour expliquer les mécanismes de contrôle, de coordination et d'apprentissage de comportements chez les organismes vivants, et pour les mettre en perspective avec l'environnement dans lequel ils évoluent (Sparrow, 1983). Nous nous sommes intéressés à cette notion qui nous paraît incontournable pour l'analyse ou la simulation du comportement humain. Sans elle, en effet, il est difficile de parler de comportements « crédibles » ou « efficaces ». La crédibilité ou l'efficacité se comprennent nécessairement à la lumière d'une économie qui doit être préalablement admise par l'observateur.

Zipf (1949) définit cette économie comme l'effort réalisé pour atteindre un objectif. Dans ses travaux où il parcourt tous les pans de l'activité humaine — de la recherche de chemin à l'expression orale — Zipf (1949) prétend que cette définition est valable non seulement pour tous les comportements mais aussi pour tous les organismes vivants. Zipf introduit le ***principe du moindre effort*** en ces termes :

“Principle of Least Effort means for example that a person in solving his immediate problems will view these against the background of his probable future problems, as estimated by himself. Moreover he will strive to solve his problems in such a way as to minimize the total work that he must expend in solving both his immediate problems and his probable futur problems. That in turn means that the person will strive to minimize the probable average rate of his

work-expenditure (over time). And in so doing he will be minimizing his effort, by our definition of effort. Least effort, therefore is a variant of least work» (Zipf, 1949, Page 1)»

En substance, le *principe du moindre effort* stipule que les êtres vivants agissent de manière à minimiser la quantité de travail nécessaire non seulement pour résoudre leurs problèmes immédiats mais aussi leurs probables futurs problèmes tels qu'ils les estiment. L'effort est donc une variante de la quantité de travail dans une perspective à long terme.

Pour pouvoir minimiser l'effort sur la durée, le sujet doit donc tout d'abord être capable d'estimer les éventualités — ses estimations étant individuelles, subjectives et sujettes à des erreurs d'appréciation comme le souligne l'auteur (Zipf, 1949, Page 7). Le principe du moindre effort suggère que le sujet sait interpréter, dans une certaine mesure, les informations pertinentes pour ses tâches, évaluer leur plausibilité et agir en conséquence.

Cependant, dans ses travaux, Zipf s'arrête à des considérations générales sans vraiment proposer de formulation explicite de l'effort. Des psychologues spécialisés, tels que Newell et Sparrow, apportent à ce concept une forme plus aboutie, que nous présentons dans la section suivante et dont nous nous inspirons pour notre travail.

2.4 Synthèse : le principe du moindre effort et la dépense énergétique

Les notions d'*effort*, *efficacité*, *économie*, *travail*, sont très employées par les psychologues du mouvement pour expliquer comment s'organisent et comment évoluent des séquences de mouvements complexes orientés vers un objectif chez les organismes vivants (Sparrow, 1983). Les êtres vivants en général, et l'homme en particulier, sont continuellement en activité. Aussi bien lorsqu'ils sont en mouvement que lorsqu'ils sont immobiles, leur organisme dépense de l'énergie du fait de son métabolisme. Cette énergie, communément appelée *énergie métabolique*, est même quantifiable et peut s'exprimer en fonction de la quantité de chaleur produite (unité = Joule) sur un intervalle de temps donné (Newell et Sparrow, 1998; Abadi *et al.*, 2010). Newell et Sparrow (1998) synthétisent plusieurs travaux dans ce domaine et proposent les observations suivantes comme bases d'une économie couvrant aussi bien le contrôle et la coordination du mouvement que son apprentissage chez les organismes vivants, en général, et chez les êtres humains en particulier (Newell et Sparrow, 1998, Page 18) :

1. Lorsque l'organisme effectue de manière répétée plusieurs séquences de mouvements permettant d'atteindre le même objectif, la séquence permettant de minimiser la

quantité d'énergie métabolique dépensée devient progressivement la plus dominante (tirée de (Hull, 1943)).

2. Lorsque l'objectif est clairement établi, le choix d'un mouvement, tout comme le non choix de mouvement, contribuent à terme à minimiser la quantité d'énergie métabolique dépensée pour atteindre cet objectif.
3. En *écoutant* les informations sensorielles relatives à sa dépense d'énergie, l'organisme sélectionne les fonctions de contrôle et de coordination de mouvement les moins coûteuses et, avec la pratique, les paramètres de contrôle sont raffinés pour une rationalisation de la consommation énergétique.

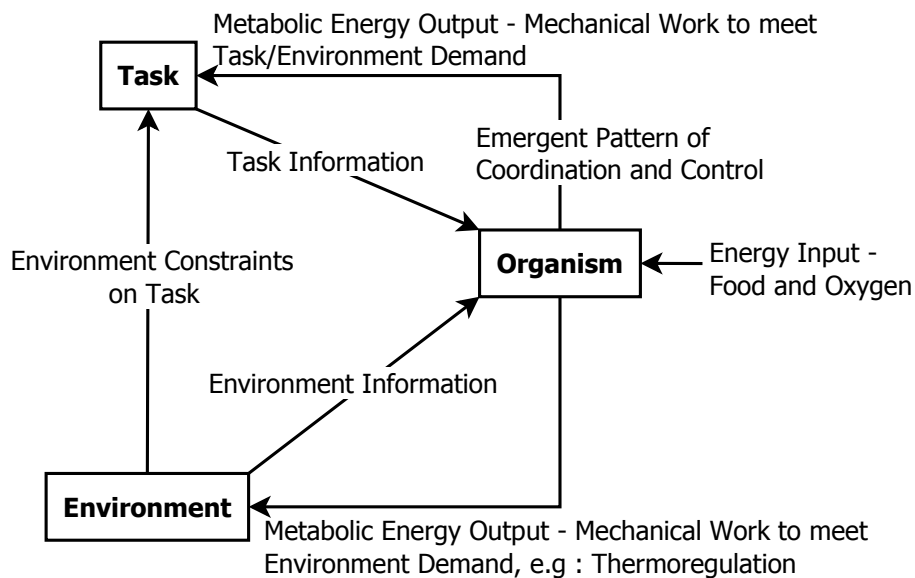


FIGURE 2.4 — Économie de mouvement basée sur la régulation de la quantité d'énergie métabolique dépensée (Newell et Sparrow, 1998)

Le principe du moindre effort, introduit par Zipf, peut donc s'explicitier en **principe de la dépense d'énergie métabolique minimale** (Newell et Sparrow, 1998, Page 18). La figure 2.4 est une proposition d'architecture comportementale axée autour de trois composants principaux — l'organisme, la tâche et l'environnement — qui montre comment la dépense énergétique régule le mouvement.

Newell et Sparrow (1998) retiennent trois classes de capteurs responsables de la transmission d'informations sensorielles au système nerveux : les capteurs **proprioceptifs**, qui surveillent l'état des muscles, des tendons et des articulations ; les capteurs **extéroceptifs**, qui transmettent des informations relatives à l'environnement (exemple : l'œil) ; les capteurs **intéroceptifs**, qui signalent l'état interne de l'organisme (température, pression artérielle, fonction digestives, etc.). Les données sensorielles les plus importantes dans la

régulation de l'économie du mouvement proviennent des capteurs intéroceptifs. Cependant, les informations provenant des capteurs extéroceptifs peuvent produire des stimuli qui conditionnent les réactions de certains organes internes. L'organisme peut alors effectuer des estimations *a priori* sur la dépense énergétique associée à une séquence de mouvements en se projetant dans l'espace, et réajuster son mouvement en fonction de cette estimation, comme le montre plusieurs expériences (Newell et Sparrow, 1998, Page 19). Ces considérations rejoignent les travaux de Goffman (1972) sur l'étude des interactions entre piétons que nous détaillons dans la section 3.3. Goffman observe que les piétons recherchent systématiquement des informations dans l'espace et externalisent leurs intentions pour se rendre compréhensibles par les autres et se coordonner entre eux. Les travaux de Newell et Sparrow portent à croire que l'énergie métabolique constitue la *monnaie* de ces interactions.

2.5 Retour sur la problématique : crédibilité et passage à l'échelle

Dans ce chapitre, nous avons présenté une revue des études empiriques qui nous semblent les plus pertinentes sur le déplacement des piétons. Nous avons évoqué notamment plusieurs phénomènes d'écoulement en les mettant en relation avec les configurations environnementales dans lesquelles ils sont observés. Ces phénomènes d'écoulement, que nous avons également appelés effets macroscopiques, sont observables dans des configurations où le niveau de congestion est important et où les influences réciproques entre les piétons sont par conséquent plus accentuées. La persistance de ces observations légitimise l'idée d'un principe de déplacement universel qui expliquerait de manière objective la nature des influences entre les piétons ainsi que la dynamique de leurs déplacements. Plusieurs travaux de recherche en psychologie du comportement soulignent l'importance de l'énergie métabolique dans la coordination, le contrôle et l'apprentissage du mouvement chez les êtres humains en particulier. Les mécanismes de régulation de la quantité d'énergie métabolique dépensée semblent être l'élément explicatif le plus décisif. Newell et Sparrow (1998) argumentent, en analysant une série de plusieurs expérimentations tirées de la littérature du domaine, que la régulation de la quantité d'énergie métabolique dépensée permet d'expliquer la dynamique des mouvements des organismes vivants à court et à long terme (Newell et Sparrow, 1998, Page 2). Ils soulignent l'importance du support d'informations sensorielles dans l'estimation de la dépense énergétique.

Nous prenons pour acquis ces travaux et posons les hypothèses suivantes pour circon-

scrire le cadre de notre réflexion :

1. Le déplacement est un mouvement continu du corps dans l'espace et dans le temps que le piéton corrige à partir de sa perception et de ces capacités motrices (Loomis *et al.*, 1992).
2. La crédibilité peut être évaluée objectivement pour un déplacement s'effectuant entre deux points, en considérant, en accord avec le principe du moindre effort appliqué au mouvement, qu'**un déplacement crédible est un déplacement économe en énergie métabolique** (Newell et Sparrow, 1998).
3. L'économie du mouvement basée sur la notion d'énergie s'applique à tout type de déplacements quelque soit le niveau de congestion. Il appartient au modélisateur de mettre en place convenablement les mécanismes de perception des acteurs de la simulation pour que leurs comportements s'adaptent à l'évolution de l'environnement.

Nous supposons que ces considérations clarifient suffisamment la notion de crédibilité pour la modélisation et l'évaluation — ce qui constituait la première difficulté de notre travail. La seconde difficulté est de proposer un modèle de déplacement crédible quelque soit le nombre d'acteurs et robuste au passage à l'échelle.

Rappelons que simuler un grand nombre d'acteurs soulève une problématique à la fois technique et scientifique. En effet, avec l'augmentation du nombre de piétons considérés, il est certes important de restreindre la consommation en ressources de calcul à des proportions raisonnables, puisque cette consommation augmente proportionnellement au nombre d'acteurs impliqués dans la simulation. Cependant, il est également important que la simulation reproduise, entre autres, les effets macroscopiques que nous avons évoqués dans la section 2.2 pour pouvoir être validée. Un bon modèle doit donc être, d'une part, suffisamment économe en ressources de calcul pour s'accommoder aux simulations pouvant mettre en scène une grande quantité d'acteurs, et d'autre part, suffisamment expressif pour garantir des déplacements crédibles quelque soit le nombre d'acteurs.

3 Modélisation des déplacements de piétons pour la simulation en temps réel

Ce chapitre présente une étude critique des modèles utilisés pour simuler les déplacements de piétons en temps réel. Le premier objectif de cette étude est d'identifier les avantages et les insuffisances de ces modèles relativement à la problématique de crédibilité et de passage à l'échelle que nous avons exposée au chapitre 2. Le deuxième objectif de ce chapitre est d'identifier les éléments de modélisation qui favorisent des solutions plus complètes. Dans cette optique, nous relevons les richesses du paradigme SMA — **S**ystème **M**ulti-**A**gents — et nous montrons en quoi il est particulièrement adapté pour répondre à nos attentes (section 3.5). À la fin du chapitre (section 3.6), nous introduisons notre contribution pour la modélisation des déplacements d'une grande quantité de piétons en temps réel. Elle consiste en un système multi-agents (SMA) permettant de coupler les dynamiques microscopique et macroscopique du déplacement des piétons. Nous expliquerons en quoi consiste ces deux dynamiques, et nous reviendrons en détails sur le modèle au chapitre 4.

Sommaire

3.1	Les niveaux de décision	24
3.2	Les modèles macroscopiques	27
3.2.1	Analogie avec la dynamique des particules	27
3.2.2	Automates cellulaires	28
3.3	Les modèles microscopiques	29
3.3.1	Les modèles à base de forces sociales	31
3.3.2	Les modèles de «steering»	32
3.3.3	Les modèles géométriques	32
3.4	Les modèles hybrides	35
3.5	Apport des systèmes multi-agents pour la simulation des déplacements	38
3.5.1	L'environnement comme une abstraction de première classe	39
3.5.2	Le principe Influence / Réaction	41
3.5.3	Systèmes multi-agents et théorie de l'utilité	45
3.6	Introduction de notre approche : modèle microscopique à influence macroscopique	48

3.1 Les niveaux de décision

Il est commun de distinguer trois niveaux de décision dans le comportement d'un piéton : un niveau **stratégique**, un niveau **tactique** et un niveau **opérationnel** (Hoogendoorn *et al.*, 2002; Hoogendoorn et Bovy, 2004; Daamen, 2004).

1. Au niveau **stratégique**, le piéton décide des activités qu'il entend réaliser dans son environnement et, le cas échéant, de l'ordonnancement entre ces activités (exemple : lire un journal, valider son ticket avant de rentrer dans le bus, acheter un sandwich). Le choix des activités est lié aux préférences et prédispositions du piéton et aux services disponibles via les infrastructures de l'environnement. Dans notre travail nous n'abordons pas les mécanismes de choix de ces activités, car il relèvent d'une autre problématique de recherche abordée au sein du projet Terra Dynamica qui concerne la modélisation des motivations des agents (Reynaud *et al.*, 2012).
2. Les activités déterminées au niveau stratégique peuvent être réalisées de plusieurs manières ou à des endroits différents. La manière précise de les réaliser et le choix

des itinéraires pour atteindre ces lieux sont considérés comme relevant du niveau **tactique**.

3. Au niveau **opérationnel**, les piétons prennent des décisions pour chaque instant conformément aux choix effectués au niveau tactique. Le choix de la trajectoire, de la vitesse de déplacement, de l'attitude, ou de toute autre action à réaliser dans l'immédiat relève de ce niveau (Daamen, 2004, Page 124).

Il peut y avoir des interactions entre les différents niveaux de décision. En particulier, l'impossibilité d'effectuer une action peut inciter le piéton à envisager d'autres alternatives pour l'activité en cours ou à modifier l'ordonnancement entre les différentes activités qu'il souhaite réaliser (voir figure 3.1).

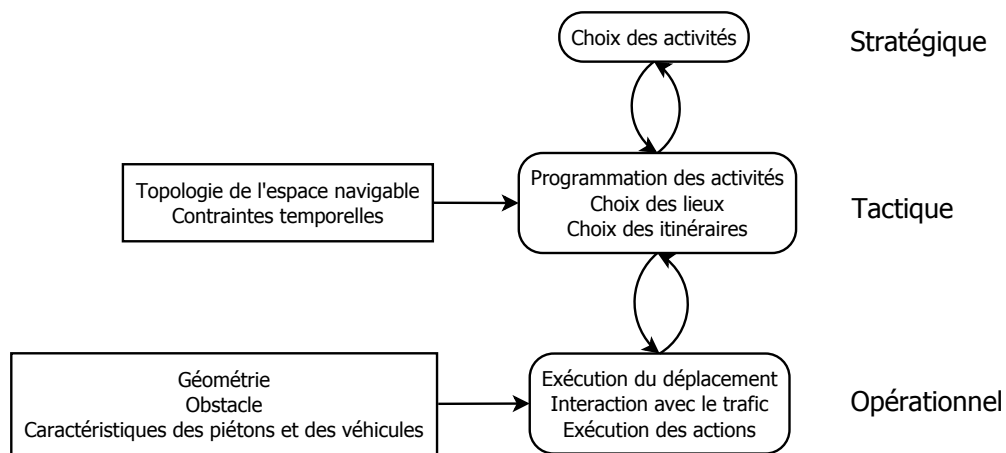


FIGURE 3.1 – Niveaux de décision (Daamen, 2004, Page 105)

Notre travail concerne les niveaux tactique et opérationnel. En effet, nous supposons que les activités sont déterminées de façon exogène et nous nous intéressons aux modèles de déplacement utilisés pour atteindre les différents lieux de manière crédible. C'est-à-dire, concrètement, aux modèles permettant de simuler les choix dynamiques d'itinéraires, de trajectoires et de vitesses de déplacement effectués par les piétons conformément aux études que nous avons abordées au chapitre 2.

Plusieurs types de classifications sont d'usage pour décrire ces modèles. Parmi les classifications les plus courantes, nous pouvons citer (Schadschneider *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2010) :

Les modèles microscopiques et modèles macroscopiques : suivant que les piétons sont représentés comme des entités autonomes, ou comme soumis à des lois d'écoulement, la complexité du modèle n'est pas la même. Les premiers types de modèles mettent

en valeur les individualités et les influences entre les différentes entités, tandis que les deuxièmes se focalisent beaucoup plus sur les propriétés statistiques de l'écoulement du trafic piéton et ne laisse aucun pouvoir décisionnel aux entités.

Les modèles discrets et modèles continus : les variables décrivant l'état de la simulation, notamment, le temps, l'espace ou les états internes des piétons (exemple : vitesse de déplacement), peuvent être représentées de manière discrète ou continue. Traditionnellement, le temps est discrétisé, ce qui introduit la notion de pas de temps, tandis que l'espace navigable et les variables d'état sont continus. Même s'il n'existe aucune convention, la manière de représenter peut être plus ou moins adaptée suivant la nature de la variable.

Les modèles déterministes et modèles stochastiques : la dynamique du déplacement des piétons peut être soit déterministe, soit stochastique. Dans le premier cas, le résultat des actions de navigation des piétons est entièrement déterminé par l'état courant du système. Dans le deuxième cas, le comportement des piétons est soumis à des lois stochastiques, une même action pouvant entraîner des résultats différents pour des situations de départ identiques (voir Stylianou *et al.* (2004)).

Les modèles à base de règles et les modèles de force : les influences entre les piétons peuvent être modélisées sous la forme de règles ou de forces. Dans le premier cas, le comportement des piétons est calculé à partir de stimuli qui se déduisent de l'état courant du système. Dans le second cas, les piétons sont soumis à des forces qui proviennent des infrastructures de l'environnement ou qui modélisent des préférences. Pour assurer la pertinence des choix, les modèles à base de règles s'accompagnent généralement d'une architecture décisionnelle et les modèles de force supposent une ou plusieurs hypothèses de conservation de mouvement.

Notons que la classification n'est pas toujours triviale et qu'un modèle donné peut correspondre à plusieurs classes suivant ses paramètres. Néanmoins, les caractéristiques ci-dessus offrent de bonnes grilles de lecture pour étudier les modèles existants.

Dans la section suivante, nous détaillons quelques modèles de déplacement. Comme grille de lecture, nous choisissons la distinction entre *modèles microscopiques* et *modèles macroscopiques* qui nous semble la plus discriminante compte tenu des orientations que nous avons choisies pour notre travail (cf. section 1.2).

3.2 Les modèles macroscopiques

L'approche macroscopique suppose que les piétons sont soumis à des lois d'écoulement. Celles-ci peuvent être discrètes ou continues. Les modèles macroscopiques qui implémentent des lois continues exploitent généralement l'analogie entre les déplacements des piétons et la dynamique des particules. Ceux qui implémentent des lois discrètes définissent généralement des automates cellulaires.

3.2.1 Analogie avec la dynamique des particules

Henderson fut l'un des premiers auteurs à exploiter l'analogie entre les déplacements de piétons et l'écoulement de particules – en particulier, des molécules de gaz – dans une perspective de simulation. Ses observations, suivant lesquelles *«le déplacement des piétons est similaire à l'écoulement de molécules de gaz qui interagissent entre elles par collisions, en respectant des lois de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie cinétique»* (Henderson, 1974), posent les bases d'une **théorie de l'écoulement du trafic piéton**.

Plusieurs auteurs s'inspirent de ces travaux et adaptent les lois de mouvement pour reproduire des situations où l'analogie avec les molécules de gaz n'est pas directement applicable (Hughes, 2002, 2003; Treuille *et al.*, 2006) (exemple : plusieurs piétons empruntant un passage étroit¹¹).

Hughes (2002) étudie les propriétés analytiques des équations capables de modéliser l'écoulement du trafic d'une forte concentration de piétons ($> 4 m^{-2}$). La démarche présentée par cet auteur est typique des modélisations continues exploitant l'analogie avec la dynamique des particules. L'auteur commence par poser 3 hypothèses traduisant, selon lui, le déplacement *moyen* d'un piéton :

H1 *La vitesse à laquelle se déplace un piéton est entièrement déterminée par la densité de son entourage et ses caractéristiques individuelles.*

Cette hypothèse est justifiée au regard des observations que nous avons présentées à la section 2.2.

H2 *Les piétons ont un sens commun du déplacement qu'ils effectuent pour atteindre leur destination. Ce sens commun peut se traduire en potentiel que les piétons associent à chaque position de l'espace et qu'ils apprécient relativement à leur destination.*

11. Voir (Henderson, 1974) pour plus de détails.

Cela suppose par exemple que deux piétons situés à des positions distinctes A et B présentant le même potentiel ($\phi_A = \phi_B$) ne verraient aucun *intérêt* à changer de place (nous revenons sur cette notion d'*intérêt* dans la section 3.5).

H3 *Les piétons ont une forte tendance à minimiser leur distance ou leur temps de trajet lorsqu'ils se déplacent. Cependant, ils tempèrent cette tendance pour éviter les zones de forte densité.*

Hughes (2002) propose ensuite un modèle de déplacement des piétons décrit par une série d'équations différentielles qui vérifient ces hypothèses. Grâce à sa compacité, ce modèle présente un grand intérêt pour la simulation d'une grande quantité de piétons. Treuille *et al.* (2006) concrétisent le modèle de Hughes (2002) pour la simulation en temps réel et représentent l'espace comme une grille uniforme de faible résolution — i.e proportionnelle à la taille des piétons — afin d'y maintenir un champ de *potentiel* dont les valeurs sont conformes aux hypothèses de Hughes (2002). L'écoulement du trafic piéton est modélisé par un champ de potentiel discrétisé via les cellules de la grille. Chaque cellule définit une valeur de potentiel qui représente le coût du chemin optimal pour atteindre le but à partir de cette cellule. La simulation consiste à calculer la valeur de la fonction de potentiel ϕ en chaque cellule de la grille — cf. algorithmes de *fast marching* (Tsitsiklis, 1995) — et à déplacer les particules dans le sens contraire du gradient de ϕ en leur appliquant la bonne vitesse (Treuille *et al.*, 2006, voir algorithme, Page 4).

De manière générale, l'intérêt des modèles macroscopiques exploitant l'analogie avec la dynamique des particules est qu'ils reproduisent des phénomènes d'écoulement du trafic piéton à moindre coût, pour une population de grande taille. En effet, la complexité des calculs ne dépend pas du nombre d'acteurs mais de la taille de l'environnement et du nombre de destinations. Cependant, ces modèles ont leurs limites car ils simulent des piétons qui ne sont pas souverains dans leurs choix. Il n'est pas toujours possible de prendre en compte les individualités sans perdre les analogies qui justifient l'intérêt de ce type de modèle (Hughes, 2003; Helbing et Johansson, 2009).

3.2.2 Automates cellulaires

Les automates cellulaires sont très proches des modèles précédents pour ce qui est du niveau de représentation. Cependant, à la place des potentiels et des coûts unitaires, les cellules contiennent plutôt des probabilités de transition vers les cellules voisines. La figure 3.2 montre une entité au centre d'une grille uniforme et pouvant se déplacer dans quatre directions. Les cellules éligibles pour une transition contiennent une probabilité non nulle

notée $P_{i,j}$, où (i, j) représentent les coordonnées relatives de la cellule par rapport à la position de l'entité.

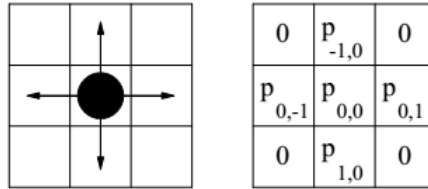


FIGURE 3.2 – Automate cellulaire - probabilités de transition (Schadschneider *et al.*, 2008)

Chaque cellule peut être occupée par un piéton et la simulation consiste à déplacer chacun des piétons vers l'une de ses cellules voisines suivant des règles de transitions définies par le modèle (Schadschneider *et al.*, 2008). Par rapport aux modèles précédents, la possibilité de modéliser les influences entre les entités grâce à des règles de transition simples et intelligibles constituent la principale attractivité des automates cellulaires (Blue et Adler, 2001). À titre d'exemple, Blue et Adler (2001) présentent trois types de règles qui permettent de simuler la **formation de files** (cf. section 2.2). Ces règles ont pour objet : la **progression vers la destination**, le **décalage en vue d'éviter les conflits ou d'accélérer**, et la **résolution de conflits d'inter-blocage** (exemple : l'échange de position). Il est possible d'intégrer des règles plus diversifiées en fonction du scénario de simulation – cf. (Schadschneider *et al.*, 2008, Page 30) pour une revue détaillée.

Les automates cellulaires sont à la frontière des représentations microscopiques et macroscopiques dans la mesure où ils essaient de reproduire les déplacements d'une grande quantité de piétons avec des règles comportementales stockées dans les cellules. C'est un paradigme qui permet déjà, d'une certaine manière, le couplage entre la dynamique macroscopique de l'environnement et la dynamique interne à chaque piéton, en admettant que cette dernière est définie par les règles de transition (Blue et Adler, 2000, 2001). Néanmoins, l'utilisation de ces règles peut pénaliser l'expressivité du modèle en limitant la complexité des simulations aux comportements imposés par les règles. Les automates cellulaires sont aussi difficilement exploitables pour l'animation en temps réel lorsque le pas de simulation est très faible puisqu'ils ne prennent pas en charge les déplacements dans un espace continu (Guy *et al.*, 2010a).

3.3 Les modèles microscopiques

À l'inverse des modèles macroscopiques, les entités élémentaires dans les modèles microscopiques sont les piétons eux-mêmes. Les modèles microscopiques procèdent d'une

approche individu-centrée qui semble plus naturelle et plus intelligible pour la modélisation des déplacements de piétons (Shao et Terzopoulos, 2005). Les travaux de Goffman (1972) que nous relevions dans le chapitre précédent (cf. section 2.3), sur la dimension sociale du comportement d'un piéton au sein d'une foule, sont d'une grande importance pour comprendre la philosophie des modèles microscopiques. Goffman (1972) propose une classification méthodique des interactions entre individus en s'appuyant sur une observation éthologique. Pour ce faire, l'auteur signale que la notion d'«**individu**» est beaucoup trop vague et ne peut être étudiée en dehors d'un système de référence. Il propose 2 référentiels qui, selon lui, résument ce que peut être un piéton qui interagit : il s'agit du **référentiel véhiculaire** et du **référentiel de participation** (Goffman, 1972, Page 5).

Suivant le **référentiel véhiculaire**, les interactions entre piétons ne sont qu'un instrument au service du déplacement. Intuitivement, le piéton n'est rien de plus qu'un véhicule interagissant avec d'autres véhicules dans le but de fluidifier son déplacement. Deux mécanismes fondamentaux permettraient de mettre en œuvre ces interactions :

1. l'**externalisation**, qui désigne les mécanismes par lesquels les piétons font connaître leurs trajectoires aux autres et se rendent compréhensibles. Il s'agit essentiellement de préfigurations gestuelles.
2. la **recherche d'information**, qui se fait de manière systématique. Les piétons semblent maintenir une zone de sécurité à l'intérieur de laquelle toute intrusion doit potentiellement faire l'objet d'une réponse (arrêt, déviation, accélération, ralentissement). Cette zone peut avoir la forme d'un cercle ou d'une ellipse en fonction de l'allure de déplacement. Le balayage de la zone se fait grâce à des mouvements de la tête (Goffman, 1972, Page 12).

Suivant le **référentiel de participation**, un piéton peut appartenir à un groupe d'une seule personne – lui même – ou de plusieurs personnes (exemple : famille, groupe d'écoliers). Les membres d'un groupe de plusieurs personnes sont *conscients* du lien social qui les unit et maintiennent entre eux une forme de *proximité écologique* qui leur permet par exemple d'échanger une conversation verbale, ou encore, d'exclure ceux qui ne sont pas membres du groupe. «**Joindre**» ou «**Quitter**» un groupe se fait suivant des **rituels** précis et connus des membres du groupe (Goffman, 1972, Page 19). L'étude des interactions entre piétons suivant ce référentiel fait intervenir une dimension affective.

Les hypothèses de Goffman se retrouvent, tel quel, dans la plupart des modèles microscopiques du déplacement que nous analysons dans les paragraphes suivants. Nous

limitons notre spectre d'analyse aux modèles qui ne s'intéressent qu'aux interactions entre piétons suivant le référentiel véhiculaire. Le référentiel de participation fait intervenir une dimension affective qui, selon nous, sort du cadre de nos travaux (les travaux de (Campano *et al.*, 2012) traitent plus particulièrement de cet aspect).

3.3.1 Les modèles à base de forces sociales

Une **force sociale** désigne un vecteur décrivant une accélération ou une décélération causée par une interaction à caractère social, et non par une interaction physique (Helbing et Johansson, 2009). Le concept de force sociale a été proposé pour la première fois par Helbing et Molnar (1998), et s'inspire de la conjecture de Henderson (1974) — cf. section 3.2.

Le modèle de forces sociales de Helbing et Molnar suppose que chaque individu α se déplace dans une direction désirée \vec{e}_α^0 avec une vitesse désirée $\vec{v}_\alpha^0 = v_\alpha^0 \cdot \vec{e}_\alpha^0$ et qu'il adapte progressivement — suivant un temps de relaxation τ_α — sa vitesse courante \vec{v}_α à sa vitesse désirée. v_α^0 désigne la norme du vecteur \vec{v}_α^0 et \vec{e}_α^0 désigne son orientation ($\|\vec{e}_\alpha^0\| = 1$).

L'équation de l'accélération, qui sert par la suite à définir la position d'un individu à chaque instant, est donnée par :

$$\vec{f}_\alpha = \frac{1}{\tau_\alpha} \cdot (\vec{v}_\alpha - \vec{v}_\alpha^0) + \sum_{\beta \neq \alpha} \vec{f}_{\alpha\beta}(t) + \sum_i \vec{f}_{\alpha i}(t) \quad (3.1)$$

Où les composantes $\vec{f}_{\alpha\beta}(t)$ et $\vec{f}_{\alpha i}(t)$ désignent les forces répulsives qui permettent de maintenir une distance avec les autres individus β et les obstacles i respectivement. Plusieurs autres forces peuvent être introduites pour modéliser, par exemple les liens affectifs entre individus (Moussaïd *et al.*, 2010) (exemple : famille, groupe d'amis, couple, etc.), ou encore des comportements altruistes (Braun *et al.*, 2005; Pelechano *et al.*, 2007).

Le modèle de forces sociales a le mérite de reproduire quelques phénomènes macroscopiques, comme la formation de file et effet sablier (Helbing et Molnar, 1998), à partir d'une formulation microscopique générique et non ambiguë (i.e. peu de paramètres). Cependant, l'hypothèse de conservation du mouvement, au delà des problèmes d'anticipation liés au fait que les interactions se limitent à un évitement de collisions réactif, est très discutable et peut biaiser certaines prédictions (Saboia et Goldenstein, 2012). En effet, les piétons peuvent s'arrêter et reprendre leur déplacement de manière quasi instantanée, se faufiler, etc., ce qui est incompatible avec certaines hypothèses de conservation (Still, 2000).

3.3.2 Les modèles de «steering»

Les modèles de steering¹², qui consistent à appliquer des *forces sociales* sans hypothèses de conservation mais suivant des règles de navigation, suscitent beaucoup d'intérêt depuis les travaux de Reynolds (2000) sur les *Boids*. En modélisant quelques règles de navigation simples — alignement, séparation et cohésion — Reynolds arrive à animer des mouvements de banc de poissons ou encore des vols d'oiseaux¹³ de manière convaincante. Depuis, plusieurs travaux visant à appliquer ce même principe à la navigation des piétons ont été proposés (Teknomo, 2002; Metoyer et Hodgins, 2003; Kamphuis et Overmars, 2004; Nieuwenhuisen *et al.*, 2007).

La définition de règles est naturellement couplée à une **architecture décisionnelle bas-niveau** afin de faire cohabiter les règles entre elles et d'assurer la persistance des choix des agents virtuels. Plusieurs exemples d'architectures décisionnelles pour les comportements d'agents virtuels existent dans la littérature (Hanon *et al.*, 2005). Pour la navigation en temps réel, les auteurs privilégient celles qui sont peu gourmandes en temps de calcul et suffisamment génériques pour s'appliquer à plusieurs scénarios (Paris *et al.*, 2007; Pettré *et al.*, 2009; Ondrej *et al.*, 2010). Malheureusement, il est difficile d'être exhaustif dans la définition des règles, ce qui constitue le véritable handicap de ce type de modèle, surtout pour la simulation des déplacements dans des espaces caractérisés par une forte densité et une forte dynamicité (Kapadia *et al.*, 2009).

3.3.3 Les modèles géométriques

Les modèles géométriques visent à calculer pour chaque individu et à chaque cycle de simulation, un déplacement élémentaire sélectionné parmi un ensemble de déplacements admissibles. Le concept de V-Obstacle développé par Fiorini et Shiller (1993) est à la base de bon nombre de ces modèles (Kluge, 2003; Fulgenzi *et al.*, 2007; Van Den Berg et Manocha, 2008; Guy *et al.*, 2009, 2010b,a; Van Den Berg *et al.*, 2010).

V-Obstacle : Soit deux agents A et B situés en p_A et p_B , et se déplaçant à la vitesse \vec{V}_A et \vec{V}_B respectivement. Le **V-Obstacle** généré par le déplacement de B relativement au déplacement de A , $VO_B^A(\vec{V}_B)$ désigne l'ensemble des déplacements élémentaires de A qui conduiraient à une collision avec B si B ne modifiait pas sa vitesse courante. Effectuer un déplacement sans collision pour l'agent A se ramène à sélectionner un déplacement en dehors de l'ensemble $VO_B^A(\vec{V}_B)$.

12. *to Steer* : entraîner, guider.

13. sourceforge.opensteer.org

RVO : Van Den Berg et Manocha (2008) proposent une utilisation pragmatique de ce paradigme dans leurs travaux sur la simulation multi-agents du déplacement en temps réel. Ils montrent qu’une application naïve du paradigme V-Obstacle conduit à des comportements erratiques — typiquement, des oscillations dans le choix des vitesses instantanées (Van Den Berg et Manocha, 2008, Page 3). Les auteurs proposent un concept dérivé, RVO (**R**eciprocal **V**elocity **O**bstacle), permettant de contourner le problème sans avoir besoin d’un mécanisme de communication explicite entre les agents, mais en partageant l’effort d’évitement de collisions entre eux.

Dans leurs travaux, Van Den Berg et Manocha généralisent ce concept de RV-Obstacle pour l’appliquer dans un environnement multi-agents avec la possibilité de définir des contraintes de mobilité pour chaque agent (Van Den Berg et Manocha, 2008, Page 5). Signalons que dans (Van Den Berg *et al.*, 2010), les mêmes auteurs proposent une formulation plus aboutie en partant du même concept, le but étant toujours de partager l’effort d’évitement de collisions entre les agents sans communication explicite. Dans cette extension, dénommée **ORCA** (**O**ptimized **R**eciprocal **C**ollision **A**voidance), les conditions permettant de calculer les vitesses admissibles, i.e les vitesses instantanées qui garantissent un déplacement sans collisions, sont plus rigoureusement définies. La formulation complète permettant de définir le modèle multi-agent pour le déplacement en temps réel s’énonce finalement comme suit (Van Den Berg *et al.*, 2010) :

Soit n agents se déplaçant dans un espace commun : l’espace navigable est un plan ($\subset \mathbb{R}^2$) et les agents sont représentés par un disque. Chaque agent A a une position courante p_A , une vitesse courante V_A et un rayon r_A qui peuvent être observés par les autres agents. La norme de la vitesse des agents est toujours en dessous d’un certain seuil V_A^{max} et idéalisée par la norme de $\overrightarrow{V_A^{pref}}$. $\overrightarrow{V_A^{pref}}$ se comprend comme la vitesse que l’agent emprunterait si aucun autre n’obstruait son chemin. $\overrightarrow{V_A^{pref}}$ et V_A^{max} ne sont pas observables par les autres agents. La tâche de chaque agent est de calculer de manière autonome (les agents calculent simultanément leurs vitesses) une nouvelle vitesse $\overrightarrow{V_A^{new}}$ qui lui garantit un déplacement sans collisions pour au moins une durée τ . La nouvelle vitesse doit être aussi proche que possible de la vitesse préférée et aucune communication explicite n’est permise avec les autres agents. Chaque agent suppose juste que les autres utilisent la même stratégie pour choisir leurs nouvelles vitesses de déplacement.

Les travaux de Van Den Berg *et al.* (2010) ont abouti à la mise en ligne d’une librairie de programmation, nommée RVOLib¹⁴, régulièrement mise à jour, et permettant de tester leur modèle sur différents scénarios.

14. <http://gamma.cs.unc.edu/RVO2>

Le modèle de Van Den Berg *et al.* (2010) présentent des intérêts majeurs d'un point de vue formel, qu'il nous semble important de relever :

- tout d'abord il fournit en sortie un *vecteur vitesse instantanée*, ce qui est l'expression la plus élémentaire d'une action dans un processus de déplacement à un niveau opérationnel (voir section 3.1 pour la définition du niveau opérationnel) (Hoogendoorn et Bovy, 2004) .
- le modèle donne la possibilité de formuler le déplacement comme un problème d'*optimisation* – le critère d'optimisation s'appliquant aux vitesses instantanées admissibles, i.e qui garantissent un déplacement sans collision.
- la formulation multi-agents autorise, par construction, la parallélisation des calculs. Ce qui permet d'obtenir des performances intéressantes sur des machines multi-processeurs (Van Den Berg *et al.*, 2010, Page 14).
- le modèle se couple sans ambiguïté avec un module de décision qui interviendrait au niveau tactique pour suggérer un itinéraire. En effet, la vitesse préférée, qui représente l'objectif courant d'un agent, pourrait être déduite d'un module de planification (Van Den Berg *et al.*, 2010, Page 13). De fait, plusieurs travaux proposent de coupler des modules de planification avec le modèle RVO afin de simuler des déplacements crédibles (Patil *et al.*, 2010; Karamouzas, 2010; Guy *et al.*, 2010a). Nous discutons de certains de ces travaux dans la section suivante 3.4.

Selon nous, l'un des principaux inconvénients des modèles microscopiques est qu'il existe une ambiguïté entre la prise en compte des interactions lors du déplacement (niveau opérationnel) et le suivi d'un itinéraire (niveau tactique). Le cadre formel permettant d'appréhender l'articulation entre ces deux niveaux n'est pas facile à définir, surtout lorsque les déplacements doivent être générés en temps réel. Les principales critiques contre les modèles microscopiques signalent cette ambiguïté comme la cause des problèmes de crédibilité des modèles microscopiques dans les espaces fortement congestionnés — voir (Treuille *et al.*, 2006). Ceci dit, en décomposant l'action de déplacement jusqu'à son expression la plus élémentaire, il semble possible de proposer des modèles plus pertinents, permettant de combiner tous les niveaux de décision de manière imperceptible. Nous nous inspirerons en particulier du paradigme des V-Obstacles pour proposer une solution dans ce sens (voir chapitre 4) en prenant soin d'éviter de confondre les actions de déplacement avec les effets souhaités de ces actions.

3.4 Les modèles hybrides

Les travaux que nous avons présentés dans les sections 3.2 et 3.3 sont particulièrement instructifs pour la simulation d'un **nombre variable de piétons**. En effet, les modèles microscopiques donnent la possibilité de tenir compte finement des caractéristiques individuelles des piétons : cependant, les processus de décisions individus-centrés semblent, à première vue, limités pour reproduire les phénomènes d'auto-organisation observés dans les espaces fortement congestionnés (Treuille *et al.*, 2006). Les modèles macroscopiques reproduisent ces phénomènes à moindre coût (en termes de ressources de calcul), mais négligent l'autonomie des piétons, ce qui entraîne un réalisme cinématique limité, et peut biaiser les résultats des simulations (Kapadia *et al.*, 2009; Guy *et al.*, 2010a).

Plusieurs travaux proposent des approches *hybrides* afin de composer les deux niveaux de représentation dans un même modèle.

Yersin *et al.* (2008) propose la notion de *ROI* — **R**egion **O**f **I**nterest — pour mettre en place des simulations de déplacements d'une grande quantité de piétons permettant de combiner les avantages des deux types de représentation. Ainsi, les régions ayant un grand intérêt pour l'observateur, utilisent des modèles microscopiques, et les régions d'un intérêt moindre (par exemple : éloignées de la caméra) utilisent des modèles macroscopiques moins coûteux ressources de calcul. Le concept de *ROI* permet de fluidifier la simulation et d'améliorer le passage à l'échelle. Cependant, il pose également de nouvelles problématiques comme la distribution des régions sur l'espace de navigation, et la cohérence des déplacements aux frontières entre les différentes régions.

Anh *et al.* (2012) adoptent une approche similaire et proposent un modèle hybride pour la simulation de l'évacuation de plusieurs piétons dans un espace urbain ayant la structure d'un réseau filaire. Le modèle hybride proposé par Anh *et al.* se décline en un **modèle macroscopique** pour simuler la partie centrale de chaque arc du réseau, et un **modèle microscopique** pour simuler les extrémités de chaque arc du réseau. Anh *et al.* proposent des mécanismes de transitions plus robustes entre les modèles de différents niveaux de représentation. Les hypothèses de simulation, à savoir la structure de l'espace (réseaux filaires), le pas de simulation (de l'ordre de la minute), sont trop contraignantes pour que ces travaux puissent être appliqués, tel quel, à la simulation des déplacements de piétons en temps réel.

Les modèles microscopiques où les piétons planifient leurs déplacements à partir d'une structure topologique contenant des informations dynamiques sur le trafic piétons constituent probablement l'une des meilleures pistes vers un couplage réussi entre la prise

en compte des interactions et le suivi d'itinéraire (Arkin, 1989). Des informations macroscopiques sont, dans ce cas, stockées dans une infrastructure de navigation (voir (Harkouken-Saiah *et al.*, 2011) pour une revue sur les infrastructures de navigation pour la simulation des déplacements en temps réel) et prises en compte par la planification. Cependant, introduire un processus de planification ne suffit pas, encore faut-il le coupler avec les actions les plus élémentaires, de manière imperceptible, en tenant compte des caractéristiques biomécaniques des piétons.

Loscos *et al.* (2003) proposent de stocker dynamiquement les informations concernant la fréquentation et les directions des agents dans une grille 2D. Ces informations sont ensuite utilisées par les agents pour s'orienter. Les auteurs ne proposent pas d'algorithme de calcul de chemin explicite mais suggèrent plusieurs règles de déplacement exploitant ces informations (Loscos *et al.*, 2003). Karamouzas *et al.* (2009) présentent une approche similaire qui exploite un algorithme A^* (Nilsson, 1980) pour permettre aux piétons de suivre des itinéraires qui contournent les zones denses. Les données sur la fréquentation de l'espace évoluent en fonction du déplacement des piétons et en fonction du temps. Sud *et al.* (2008) exploitent un graphe de navigation dynamique – dont la structure topologique est modifiée en temps réel – et utilisent les liens pour accélérer les calculs d'évitement de collision et détecter les zones de congestion. Saboia et Goldenstein (2012) modifient le modèle de Helbing et Molnar (1998) et associent à chaque agent une grille de perception mobile qui lui permet de calculer des vitesses désirées en temps raisonnable et en tenant compte de la densité.

Ces travaux proposent plusieurs solutions techniques intéressantes pour la prise en compte de la congestion, mais n'insistent pas assez sur le cadre formel permettant d'appréhender la complexité du comportement, notamment, **l'articulation entre la planification d'itinéraire et la prise en compte des interactions entre agent, et la nature des influences entre les agents**, qui donne leur véritable sens aux informations stockées dans les infrastructures de navigation et qui justifie les méthodes de planification employées. L'importance donnée aux performances computationnelles semblent prendre le dessus sur la recherche de la crédibilité proprement dite.

PLEdestrians

Guy *et al.* (2010a) proposent une formulation basée sur le principe du moindre effort pour modéliser le déplacement de piétons de manière générique. Guy *et al.* s'appuient sur les travaux de Whittle (2007) concernant l'étude analytique de la quantité d'énergie métabolique dépensée par des piétons en déplacement, et réutilisent les formules proposées par ce dernier pour construire un modèle de simulation crédible. En effet, en mesurant

sa consommation d'oxygène, Whittle justifie empiriquement que la puissance instantanée P dépensée par un piéton en déplacement peut être modélisée comme une fonction de sa vitesse instantanée v :

$$P = e_{debout} + e_{marche} \cdot |v|^2 \quad (3.2)$$

Où e_{debout} et e_{marche} sont des constantes individuelles qui valent en moyenne respectivement ¹⁵ $2.23 \frac{J}{kg \cdot s}$ et $1.26 \frac{J \cdot s}{kg \cdot m^2}$. Guy *et al.* adaptent cette formule en (3.3) pour modéliser la quantité d'énergie métabolique dE dépensée pour un déplacement élémentaire ($mass$ désigne la masse du piéton) :

$$dE = mass \cdot (e_{debout} + e_{marche} \cdot |v|^2) \cdot dt$$

$$dE = \underbrace{mass \cdot (e_{debout} \cdot dt)}_{dE_{debout}} + \underbrace{mass \cdot (e_{marche} \cdot |v|^2 \cdot dt)}_{dE_{marche}} \quad (3.3)$$

Intuitivement, cette formule traduit le fait que l'énergie dépensée par un piéton est, d'une part, fonction du temps, indépendamment du mouvement, et d'autre part, fonction de la vitesse de déplacement prise au cours du temps. Cette formule confirme que les temps d'arrêt ne sont pas anodins dans la régulation de la dépense énergétique. Nous reviendrons sur cette considération dans la présentation de notre modèle au chapitre 4.

L'architecture de navigation proposée par Guy *et al.* (voir figure 3.3) organise finalement le déplacement d'un agent en deux étapes :

1. **La première étape** consiste à calculer un itinéraire qui minimise une estimation de E , à partir d'un graphe de navigation. Pour réaliser cette estimation, le modèle intègre un module macroscopique qui stocke en temps réel les vitesses moyennes de transitions sur les différents arcs du graphe de navigation. L'itinéraire est calculé grâce à un algorithme A^* (Nilsson, 1980).
2. **La deuxième étape** consiste à optimiser itérativement la vitesse de déplacement le long de l'itinéraire pour un laps de temps τ , toujours relativement à E . La vitesse optimale pour le laps de temps τ est ensuite utilisée comme vitesse préférée et envoyée à un module plus bas-niveau chargé de l'évitement de collision (voir figure 3.3). Notons que ce module exploite le modèle RVO.

Les expérimentations réalisées par Guy *et al.* (2010a) pour évaluer leur modèle montrent des phénomènes d'auto-organisation parmi ceux qui ont été cités dans la section

15. kg : kilogramme; J : Joules; m : mètre; s : seconde.

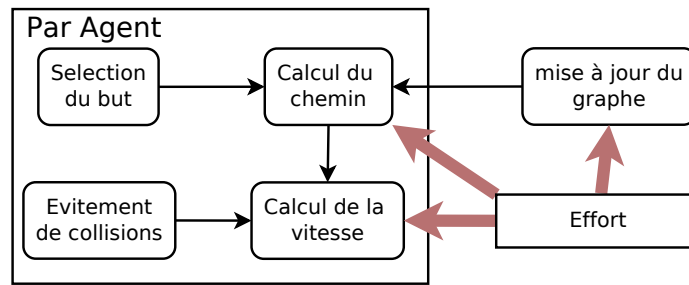


FIGURE 3.3 – Vue schématique de l’architecture de navigation (Guy *et al.*, 2010a). Le module chargé de l’évitement de collision intègre le modèle RVO

2.2 : effet de bord, formation de file, effet accordéon (Guy *et al.*, 2010a, Page 7). Cependant, deux principales insuffisances transparaissent : la première est que la planification de chemin pour minimiser l’effort global ne tient pas compte de l’évolution du trafic et de la perception limitée des agents ; la deuxième est que laps de temps utilisé pour l’estimation de l’effort entre deux points de passage est choisi de manière arbitraire. Les auteurs reconnaissent eux-mêmes les limites des heuristiques d’estimation de l’effort et se donnent comme perspective de les améliorer (Guy *et al.*, 2010a, Page 9).

Dans notre travail, nous partons d’une approche similaire, i.e. basée sur la notion du moindre effort. Nous proposons une abstraction plus rigoureuse de l’environnement en nous inspirant notamment de concepts issu du paradigme multi-agents. Nous proposons également un approche évolutionniste pour la planification de déplacements, plus adaptée au temps réel et plus sensible à l’évolution du trafic.

3.5 Apport des systèmes multi-agents pour la simulation des déplacements

Les *agents* sont généralement compris comme des entités physiques ou virtuelles qui agissent¹⁶, et les systèmes multi-agents, comme une agrégation d’agents agissant et interagissant via des *moyens de communication* dans un même *environnement* (Wooldridge, 2002). Les modalités et la finalité de l’*agir*, l’objet et les mécanismes d’*interaction* entre agents, ou encore, la nature de l’*environnement* sont difficilement descriptibles de manière générique — cela constitue d’ailleurs l’une des grandes richesses des concepts d’*agent* et d’*environnement*. Une autre richesse du concept d’*agent*, qui marque une différence essentielle avec le concept d’*objet* par exemple, est que l’agent est lui même une source

16. Définition du dictionnaire *Le petit Robert*.

de contrôle : les actions d'un agent ne sont pas déclenchées de l'extérieur, mais par lui-même, en réponse à des stimuli ou pour satisfaire des objectifs. Ainsi est-il possible de distinguer deux grandes classes d'agents¹⁷ : les agents *réactifs* et les agents *cognitifs*. Le comportement d'un agent réactif se résume à une activité réflexe, tandis que celui d'un agent cognitif dépend d'un état interne susceptible d'évoluer.

En informatique, l'utilisation du paradigme SMA pour l'étude des systèmes complexes est un exercice très courant (Drogoul et Ferber, 1994; Ferber et Perrot, 1995; Jennings, 2000), et présente un grand intérêt scientifique. En effet, un système complexe peut être vu comme une *organisation* d'entités dont il est impossible de prédire l'évolution sans tenir compte des interactions qui existent entre elles — la modélisation et la simulation de tels systèmes via le paradigme SMA sur des supports adéquats permettent d'observer leur évolution, de tester ou de valider des hypothèses sur les comportements des agents, la nature des interactions, etc.

La simulation de déplacements de piétons fait partie des nombreux cas pratiques pour lesquels les modèles multi-agents semblent les plus naturels et les plus intelligibles (Shao et Terzopoulos, 2007), grâce notamment au parallèle intuitif entre un agent et un piéton. Nous ne remettons pas en cause cette *intuition*, bien au contraire. Dans cette section nous relevons, à travers une sélection de travaux, quelques éléments de modélisation issus du paradigme SMA qui nous semblent sous-exploités dans les différents travaux de recherche que nous venons d'explorer concernant la simulation déplacement de piétons.

3.5.1 L'environnement comme une abstraction de première classe

Une pratique courante dans la simulation des déplacements de piétons est d'utiliser l'environnement uniquement comme une infrastructure de navigation pour les agents (graphe, grille). Cette seule perspective limite la portée du concept d'«environnement» et ne permet pas d'exploiter son potentiel dans toute sa mesure dans un Système Multi-Agent (Weyns *et al.*, 2006; Stratulat *et al.*, 2009).

Weyns *et al.* (2006) définissent l'environnement comme une abstraction de première classe qui fournit les conditions nécessaires pour que les agents existent, et qui coordonne à la fois les interactions entre les agents et l'accès aux ressources. Cette définition entraîne plusieurs conséquences pour la modélisation des systèmes multi-agents (Weyns *et al.*, 2006, Page 15) :

- **Abstraction de première classe** : indépendamment des agents, l'environnement

17. Il existe plusieurs autres classifications, voir (Wooldridge, 2002).

est un composant à part entière du système qui a des responsabilités propres.

- **Conditions d'existence** : l'environnement est un composant essentiel de tout système multi-agent, avec lequel les agents interagissent et à travers lequel leurs actions peuvent être observées et évaluées. D'une certaine manière, l'environnement connecte les agents entre eux d'une part, et à un *espace d'activités* d'autre part.
- **Coordonnateur d'interaction et d'accès aux ressources** : l'environnement conditionne le partage des informations et les interactions entre les agents. Cela signifie que, par construction, l'environnement fournit un espace de conception qui peut être exploité pour le déploiement d'un SMA. Distinguer ce qui relève de l'environnement de ce qui relève des agents est important pour appréhender la complexité d'une application SMA.

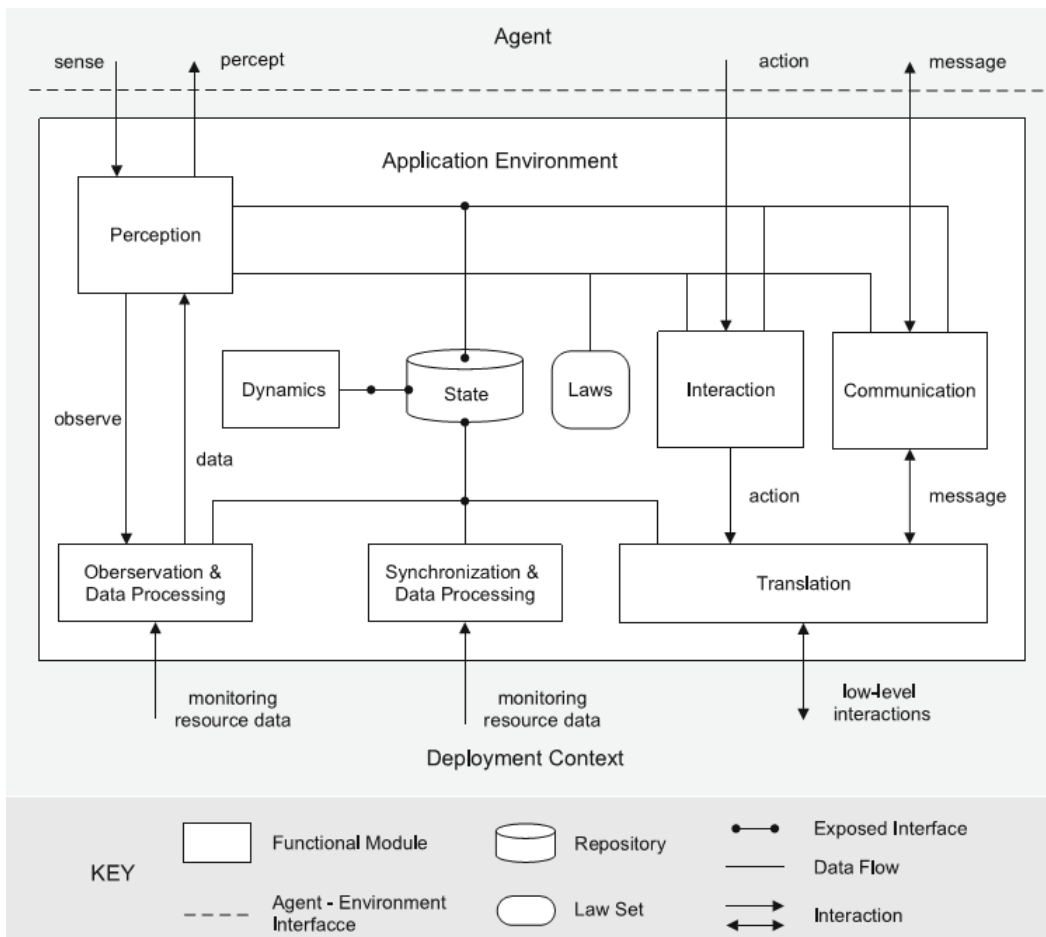


FIGURE 3.4 – modèle d'environnement pour les systèmes multi-agent (Weyns *et al.*, 2006)

Pour concrétiser cette définition, les auteurs déclinent les responsabilités de l'environnement en cinq rôles (Weyns *et al.*, 2006, Page 15-17) et proposent un modèle d'environnement pour les systèmes multi-agents (voir figure 3.4) :

1. **L'environnement est un composant structurant pour le système multi-agents** : structure physique (espace, topologie, répartition, etc.), structure de communication (transfert de messages, stigmergie, support de communication implicite, etc.), structure organisationnelle (rôle, groupes, sociétés).
2. **L'environnement contient des ressources et des services** : les ressources et les services peuvent être situés dans une structure physique. L'environnement fournit une abstraction qui les rend perceptibles et intelligibles par les agents.
3. **L'environnement peut maintenir sa propre dynamique**, exemple : évaporation, agrégation, diffusion de phéromones, maintien d'un champ de vecteur dans un réseau, etc.
4. **L'environnement est localement observable par les agents et localement accessible aux agents** : contrairement à l'état interne des agents, l'environnement doit être observable pour que les agents puissent inspecter les différentes ressources, services et éventuellement les états externes des autres agents. Plus encore, les agents doivent pouvoir observer l'environnement de manière sélective, i.e. relativement à leur tâche courante.
5. **L'environnement peut définir des règles pour le système multi-agents** : ces règles peuvent être spécifiques au domaine ou imposées par le concepteur.

Les travaux de Weyns *et al.* (2006) concrétisent la différence ontologique qui existe entre les agents et l'environnement et proposent un intéressant patron de conception pour la simulation multi-agent. Nous ferons ressortir ces cinq rôles dans notre travail (voir section 3.6) et nous expliquerons en quoi cette clarification est utile pour notre problématique générale.

3.5.2 Le principe Influence / Réaction

La dynamique du comportement des agents et celle de l'environnement font souvent l'objet d'un amalgame très répandu dans les travaux sur la simulation multi-agents (Ferber et Müller, 1996; Michel *et al.*, 2003). Cet amalgame trouve vraisemblablement sa racine dans la confusion entre *l'action d'un agent* et *le résultat de son action dans l'environnement*. C'est en substance ce que soulignent Ferber et Müller (1996) dans leur travaux sur une théorie de l'action basée sur les notions d'**influence** et de **réaction**. Suivant cette théorie, les **influences** sont produites par les agents avec pour objectif de modifier le cours des événements¹⁸ ; la **réaction** de l'environnement se traduit en un changement

18. La production des influences relève de la dynamique interne de l'agent, que nous appellerons aussi : dynamique microscopique.

d'état et correspond à la réponse de l'environnement, conformément à ses lois propres, aux différentes influences produites par l'ensemble de tous les agents¹⁹.

Selon les auteurs, la distinction explicite entre ces deux notions est une réponse aux **problèmes de cadre** (Hayes, 1971) pour la simulation de comportements situés — les problèmes de cadre viennent du fait qu'il est difficile d'énumérer tous les effets possibles d'une action à priori, d'autant plus que certains effets sont les conséquences de lois universelles (Hayes, 1971). L'introduction d'une telle distinction permet de tenir compte de la **simultanéité** des actions et de toutes ses conséquences. En théorie, en effet, les agents ne peuvent pas changer l'état du monde de leur propre fait. Cela supprime les conflits éventuels entre deux actions qui peuvent s'annuler mutuellement parce qu'elles sont exécutées simultanément et que l'une a pour pré-conditions les effets de l'autre (Exemple : un agent A_1 qui déplace un objet de X à Y en même temps qu'un agent A_2 qui déplace le même objet de Y à X).

Un modèle d'action défini en termes d'**influence** et de **réaction** sous-entend donc (Ferber et Müller, 1996, Page 3) :

1. La distinction claire entre les influences et les réactions.
2. La décomposition de l'ensemble de la dynamique du système en deux parties : la dynamique de l'environnement et la dynamique des agents situés dans l'environnement.
3. La description explicite des deux dynamiques par des machines à états.

Ferber et Müller (1996) introduisent la notion d'**état dynamique** et reformule les concepts de **perception** et de **comportement** avec les termes de cette théorie.

Ainsi, un **état dynamique** $\delta = \langle \sigma, \gamma \rangle \in \Delta$ décrit l'environnement à un moment donné. Δ désigne l'ensemble de tout les états dynamiques. $\sigma \in \Sigma$ représente une variable environnementale et $\gamma \in \Gamma$, une influence qui matérialise une *tendance de changement*. Σ et Γ désignent respectivement l'ensemble des variables environnementales (exemple : positions et vitesses instantanées des objet mobiles) et des influences. La dynamique de l'environnement est une application dans Δ qui à un état $\delta = \langle \sigma, \gamma \rangle$ associe un autre état $\delta' = \langle \sigma', \gamma' \rangle$, et qui peut se décomposer en deux fonctions $React : \Delta \times \Gamma \rightarrow \Sigma$ et $Exec : \Sigma \times \Gamma \rightarrow \Sigma$ telles que :

$$\sigma' = React(\sigma, \gamma) \text{ et } \gamma' = Exec(\sigma', \gamma) \quad (3.4)$$

Les perceptions d'un agent a sont notées $P_a \subset \Sigma$, et sa fonction de perception $Perception_a : \Sigma \rightarrow P_a$. Son comportement s'explique différemment suivant qu'il est **réactif** ou **cognitif**. Un agent réactif agit uniquement en fonction de ce qu'il perçoit. Son

19. La réaction relève de la dynamique de l'environnement : dynamique macroscopique.

processus de délibération se limite à une activité réflexe $Reflex_a$ et son comportement $Behaviour_a$ peut s'écrire :

$$\begin{aligned} Behaviour_a & : \Gamma \rightarrow \Gamma \\ Behaviour_a(\gamma) & = Reflex_a(Perception_a(\gamma)) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Si a est un agent cognitif, l'ensemble de ses états internes est noté S_a . $Behaviour_a$, ne peut plus être représenté par une simple fonction réflexe, mais par au moins deux fonctions qui peuvent se noter :

- $Memorisation_a : P_a \times S_a \rightarrow S_a$, qui retourne un nouvel état à partir des perceptions courantes de l'agent
- $Decision_a : S_a \rightarrow \Gamma$, qui produit de nouvelles influences suivant l'état courant de l'agent

$$\begin{aligned} Behaviour_a & : S_a \times \Gamma \rightarrow S_a \times \Gamma \\ Behaviour_a(< s, \sigma >) & = < s', Decision_a(s') > \\ & \text{avec } s' = Memorisation(Perception(\sigma), s) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Le modèle **IRM4S** (Influence Reaction Model for Simulation) proposé dans (Michel, 2007) reprend les grandes lignes de cette théorie et concrétise la manière dont les deux dynamiques s'articulent entre elles pour la simulation en temps réel. Michel (2007) insiste sur la dynamique endogène de l'environnement, en introduisant notamment une variable temporelle explicite t , et sur le fait que l'environnement peut lui aussi produire des influences (objets en mouvement, loi physique, évaporation de phéromones, etc.) qui sont en *concurrence* avec celles produites par les agents (Michel, 2007, Page 11).

Pour modéliser la dynamique endogène de l'environnement, Michel (2007) propose deux fonctions qui s'exécutent de manière séquentielle (voir figure 3.5). Tout d'abord, la fonction *Influence* qui agrège les influences produites pour l'état dynamique courant, i.e. celles qui sont produites par les agents et par l'environnement :

$$\begin{aligned} Influence & : \Sigma \times \Gamma \rightarrow \Gamma \\ Influence(< \sigma(t), \gamma(t) >) & = \gamma'(t) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Ensuite la fonction *Reaction* qui définit la manière dont le monde se transforme pour donner place à un nouvel état dynamique :

$$\begin{aligned} Reaction & : \Sigma \times \Gamma \rightarrow \Sigma \times \Gamma \\ Reaction(< \sigma(t), \gamma(t) >) & = < \sigma(t + dt), \gamma(t + dt) > \end{aligned} \quad (3.8)$$

L'introduction de la variable temporelle permet au modèle IRM4S de clarifier les différentes contributions dans la phase d'influence. Pour un **agent cognitif** a , le comportement $Behavior_a$ se décompose en trois fonctions qui s'exécutent de manière séquentielle :

$$\begin{aligned} p_a(t) &= Perception_a(\sigma(t), \gamma(t)) \\ s_a(t+dt) &= Memorisation_a(p_a(t), s_a(t)) \\ \gamma'_a(t) &= Decision_a(p_a(t), s_a(t+dt)) \end{aligned} \quad (3.9)$$

L'environnement produit naturellement des influences par une fonction $Natural_w$.

$$\gamma'_w(t) = Natural_w(< \sigma(t), \gamma(t) >). \quad (3.10)$$

Et donc finalement,

$$Influence(< \sigma(t), \gamma(t) >) = \{\gamma(t) \cup \gamma'_w(t) \cup_a \gamma'_a(t)\} \quad (3.11)$$

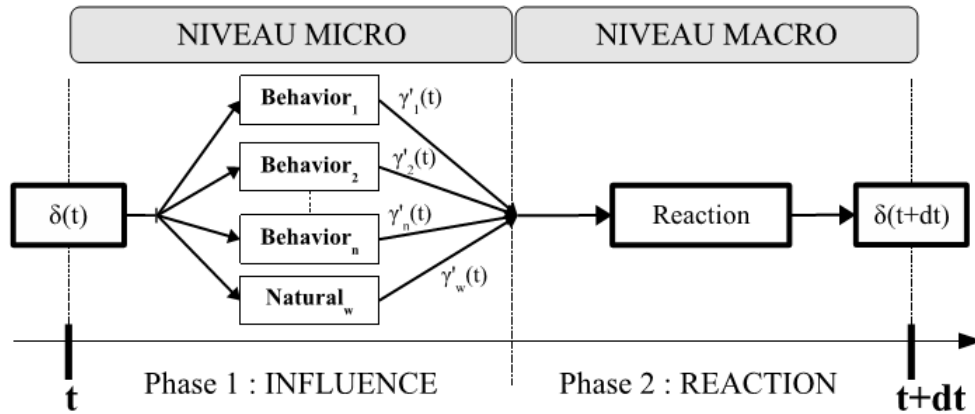


FIGURE 3.5 – Diagramme de séquence de l'évolution d'un système multi-agent modélisé avec le modèle IRM4S (Michel, 2007)

Le modèle IRM4S, et plus généralement le principe influence réaction, assume pleinement l'environnement en tant que composant à part entière du système multi-agents, conceptuellement indépendant des agents. L'articulation entre les dynamiques propres à l'environnement et aux agents est clairement établie d'un point de vue théorique. Le modèle préserve l'autonomie des agents cognitifs, tout en tenant compte du fait qu'ils puissent être soumis à une dynamique exogène à leur comportement. Tout ceci rend le modèle très intéressant pour appréhender la complexité de la simulation des déplacements de piétons. À notre connaissance, très peu d'applications concrètes du modèle IRM4S existent pour la modélisation des déplacements de piétons en temps réel. Nous notons les travaux de Morvan et Jolly (2012), qui adaptent le modèle pour des simulations multi-niveaux, et ceux de Simonin *et al.* (2011), qui utilisent le principe influence/réaction pour mettre en place un modèle multi-agent pour la régulation du trafic de véhicules automatiques.

3.5.3 Systèmes multi-agents et théorie de l'utilité

Modéliser le processus de délibération qui est à la base du choix d'une action dans un système multi-agents, et plus particulièrement d'une action de déplacement, est un exercice complexe. Les interactions entre agents doivent être prises en compte dans une juste mesure puisque les actions des uns peuvent influencer la décision des autres.

L'approche dominante pour aborder ce genre de problématique en simulation comportementale est la **théorie de l'utilité** (Von Neumann et Morgenstern, 1944). La théorie de l'utilité propose de mesurer la satisfaction d'un agent pour une alternative donnée (ensemble de ressources, plans d'actions, etc.). Dans les environnements incertains, elle permet d'évaluer les alternatives en tenant compte des différentes issues possibles des actions.

La théorie de l'utilité fournit des outils pragmatiques pour modéliser plusieurs problèmes de décision tirés de la vie réelle. Parmi ces problèmes, les **jeux de congestion** (Rosenthal, 1973; Milchtaich, 1996) nous semblent particulièrement intéressants pour notre travail. Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons les jeux de congestion et nous expliquons ce que nous en tirons comme éléments de modélisation. Nous utiliserons les termes «*profil d'action*», pour désigner une affectation d'actions possible parmi les agents, «*stratégie*», pour désigner une fonction qui associe une action à chaque état, et «*profil de stratégies*» pour désigner une affectation de stratégies possible parmi les agents.

Jeu de congestion

La théorie des jeux s'inspire de concepts provenant des mathématiques et des sciences économiques et propose de modéliser par un formalisme abstrait les interactions entre des agents qui décident relativement à une fonction d'utilité. Un jeu est composé d'un ensemble de joueurs, de règles et d'une fonction d'utilité. Chaque joueur doit alors établir une stratégie (ou politique) lui permettant de décider comment agir à chaque tour de jeu afin de maximiser son utilité.

Un jeu de congestion est une sous-classe de jeu qui en propose une représentation simplifiée en imposant des contraintes sur les effets que les actions d'un agent peuvent avoir sur l'utilité des autres (Shoham et Leyton-brown, 2009). Intuitivement, dans un jeu de congestion, les agents utilisent une ou plusieurs ressources pour effectuer leurs actions. L'utilisation d'une ressource a un coût qui est fonction du nombre d'agents qui l'utilisent.

Formellement, un jeu de congestion est un tuple (N, R, A, C) , où :

- $N = (1, \dots, i, \dots, n)$ est un ensemble de n agents.
- $R = (1, \dots, k, \dots, r)$ est un ensemble de r ressources.
- $A = A_1 \times \dots \times A_i \times \dots \times A_n$, où $A_i \subset 2^R \setminus \emptyset$ est l'ensemble des actions disponibles

pour l'agent i . Ici, $2^R \setminus \emptyset$ désigne l'ensemble des sous-ensembles non vides de R .

- $C = (c_1, \dots, c_k, \dots, c_r)$, où $c_k : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ est la fonction de coût associée à la ressource $k \in \mathbb{R}$.

L'utilité des agents se définit en termes de coût et varie suivant les profils d'actions. En posant $\sharp : R \times A \rightarrow \mathbb{N}$, la fonction qui compte le nombre d'agents utilisant une ressource donnée pour un profil d'action a , la fonction d'utilité d'un agent i suivant a se définit par :

$$u_i(a) = - \sum_{r \in R | r \in a_i} c_r(\sharp(r, a))$$

Une bonne décision pour un agent consiste à utiliser les ressources qui lui apportent la satisfaction optimale relativement à sa fonction d'utilité.

Jeu de congestion et déplacements crédibles

Nous pouvons identifier plusieurs points communs entre un jeu de congestion et le problème de navigation des piétons dans un espace potentiellement dense et dynamique. Les piétons se déplacent en tenant compte des autres piétons — en cela, ils interagissent — car leurs déplacements ont lieu dans un espace commun. Ceci sous-entend non seulement de fortes contraintes physiques dans l'exécution des actions de déplacement (exemple : indépendamment de leur décision, deux piétons ne peuvent pas occuper la même position au même moment), mais aussi des contraintes dans le processus de délibération (exemple : un piéton ne peut pas faire abstraction du fait que deux piétons ne puissent pas occuper la même position au même moment) : il existe une intéressante analogie entre cet espace commun et la notion de ressource, au sens des jeux de congestion, et un lien étroit entre le coût d'une ressource et la dépense énergétique comme nous allons le justifier dans le paragraphe suivant.

En effet, en posant que l'objectif d'un piéton est d'atteindre une destination en rationalisant la dépense en énergie métabolique (cf. section 2.5), le coût d'un déplacement peut être compris comme une estimation de la quantité d'énergie métabolique pour atteindre la destination. Ainsi, une mesure d'utilité consistante pour une action de déplacement élémentaire équivaut à la quantité d'énergie métabolique dépensée par l'agent pour cette action²⁰. Dans le même ordre d'idée, une mesure d'utilité peut aussi être associée à un déplacement entre deux régions voisines de l'espace r_i et r_j , en posant que cette mesure équivaut à la quantité d'énergie métabolique permettant d'atteindre r_j depuis r_i . La no-

²⁰. Par exemple, en posant dE cette quantité d'énergie métabolique, la mesure d'utilité peut s'écrire $-dE$.

tion de ressource, au sens des jeux de congestion, peut donc s'appliquer sans ambiguïté à une région de l'espace : se déplacer se ramène à progresser vers une destination à partir d'une région de l'espace, dit autrement, à *utiliser* une ressource (ressource = région de l'espace) pour évoluer vers la destination. Le coût d'une ressource se comprend ici comme une estimation de la quantité d'énergie métabolique nécessaire pour **utiliser** la ressource, i.e une estimation de la quantité d'énergie métabolique que l'agent dépenserait pour traverser la région de l'espace correspondante. Ce coût varie en fonction de la fréquentation de la ressource et en fonction du sens dans lequel l'agent se déplace.

En admettant le parallèle entre les jeux de congestion et les déplacements de piétons dans un espace potentiellement dense et dynamique, construire un déplacement crédible se ramène à sélectionner les ressources qui minimisent une estimation de la dépense énergétique totale suivant une stratégie quelconque — l'estimation se déduit des coûts d'utilisation de chaque ressource. L'intérêt d'un tel parallèle est double. Ce parallèle nous permet de poser le problème dans un cadre formel intelligible et nous autorise à réutiliser les solutions algorithmiques éprouvées par les théoriciens des jeux de congestion (Glover et Laguna, 1997; Casali *et al.*, 2007) pour proposer des stratégies de déplacement.

Toutefois l'application de ce formalisme pour notre problème ne peut être immédiate. L'individualité de la décision et les caractéristiques biomécaniques des agents doivent être pris en compte pour que la formulation soit réaliste :

- Les jeux de congestion classiques suggèrent que la fonction de coût est la même pour tous les agents : cette hypothèse paraît très réductrice si les agents modélisent des piétons. Les piétons estiment leurs dépenses énergétiques en tenant compte de leurs caractéristiques individuelles et cette particularité doit être prise en compte dans la formulation.
- La décision ne s'effectue pas en un seul tour, mais en plusieurs tours, jusqu'à ce que l'agent ait atteint sa destination : cet aspect répétitif du jeu doit être pris en compte dans l'élaboration d'une quelconque stratégie pour les agents.
- Les actions des agents sont soumis à des lois d'écoulement (Ferber et Müller, 1996; Michel, 2007) : dans une perspective de simulation en temps réel des comportements, cette dimension est fondamentale et doit être prise en compte dans la formulation du problème.

L'intérêt du cadre formel proposé par les jeux de congestion est que l'introduction des ressources permet de convertir les actions des autres agents en grandeurs mesurables, et ainsi, de tenir compte des interactions entre agents de manière plus pragmatique. Cela simplifie l'évaluation des choix des agents. Nous nous sommes inspirés des jeux de congestion pour modéliser le déplacement des piétons et pour la définition de stratégies

de déplacement. L'originalité de notre contribution est que nous intégrons les points que nous avons évoqués dans le paragraphe précédent dans notre formulation.

3.6 Introduction de notre approche : modèle microscopique à influence macroscopique

En parcourant quelques travaux sur la modélisation des déplacements de piétons en temps réel, nous avons mis à jour un paradoxe qui semble conduire fatalement à des solutions partiellement satisfaisantes. En effet, la pratique courante tend à opposer deux dynamiques du déplacement des piétons pourtant complémentaires. Il s'agit des dynamiques :

- microscopique, qui découle du fait que les piétons sont des agents autonomes et souverains dans leurs actions. Les piétons planifient eux même leurs actions, en fonction de leurs objectifs et de leurs perceptions.
- macroscopique, qui vient du fait que les piétons sont des agents situés dans un environnement qui définit des contraintes physiques et dynamiques. Les piétons sont donc par définition soumis à des lois d'écoulement.

Notre position est que ces deux dynamiques ne s'opposent pas mais s'influencent mutuellement, et qu'il n'est pas légitime de privilégier l'une au détriment de l'autre. Le déplacement d'un piéton, bien que traduisant ses objectifs et dépendant de ses dispositions individuelles, se déroule dans un environnement qui possède des lois propres et une dynamique propre. La démarche la plus pertinente, selon nous, est plutôt de formuler le problème de manière à préserver ces deux dynamiques sans ambiguïté – nous insistons sur le fait qu'il ne s'agit pas de juxtaposer un modèle microscopique et un modèle macroscopique, mais de définir un modèle conforme à la nature même du déplacement. Suivant cette idée, notre contribution se décline en deux points.

Premièrement, nous proposons une *formulation générique du problème*. Nous considérons que le déplacement d'un agent (piéton) consiste à aller d'un point A à un point B en minimisant la dépense énergétique. Dans notre formulation, chaque piéton est un agent situé dans l'environnement et utilise des ressources de navigation pour construire son déplacement. Les ressources de navigation sont des régions de l'espace. Elles sont médiatrices des interactions entre les agents et définissent des mesures dynamiques qui permettent aux agents d'estimer leurs dépenses énergétiques relativement à leurs objectifs. Notre formulation reprend les termes propres aux jeux de congestion (Roughgarden, 2002; Shoham et Leyton-brown, 2009). Son originalité est que nous tenons compte des

individualités, de la dimension temps réel et du passage à l'échelle dans la définition des mesures dynamiques et des stratégies de déplacement.

Deuxièmement, nous présentons *un modèle multi-agents* pour la mise en œuvre d'une simulation suivant notre formulation. Nous verrons que le concept d'environnement du paradigme multi-agents est particulièrement adapté pour appréhender la complexité du comportement et de la simulation. D'une part, l'environnement peut être vu comme un composant indépendant qui maintient les mesures dynamiques que les agents utilisent pour mettre en place leurs stratégies de déplacement. D'autre part, l'environnement peut-être vu comme un garant des lois de la dynamique qui coordonne les mouvements des agents. Une importante partie de la dynamique du système tout entier peut ainsi être **déléguée** à l'environnement sans conséquence sur l'autonomie des agents. Ici, nous reprenons la théorie de l'action développée par Ferber et Müller (1996) et Michel (2007), et nous tenons compte des spécificités de notre formulation, en particulier, la maintenance des mesures dynamiques nécessaires pour la planification des déplacements.

Notre travail se démarque des approches microscopiques classiques en deux aspects principaux : (1) Nous envisageons de représenter l'environnement comme un composant indépendant et ontologiquement différent des agents, qui est pris en compte à tous les niveaux de décision des agents. (2) Nous clarifions le cadre formel dans lequel les interactions entre agents sont prises en compte et proposons des solutions algorithmiques adaptées au temps réel et au passage à l'échelle pour élaborer les stratégies de déplacement des agents.

4 Modèle microscopique à influence macroscopique

Dans ce chapitre nous présentons notre contribution pour la modélisation des déplacements d'une grande quantité de piétons en temps réel. Notre principal objectif est de clarifier le cadre formel permettant d'appréhender la complexité du déplacement des piétons et de la simulation. Notre modèle **M**icroscopique à **I**nfluence **M**acroscopique (MIM) s'inspire du *principe du moindre effort* (Newell et Sparrow, 1998) pour formuler le problème de navigation de manière objective, et implémente le *principe d'influence réaction* (Ferber et Müller, 1996) pour mettre en œuvre les actions des agents en préservant la dynamique microscopique du comportement des agents et la dynamique macroscopique de l'écoulement du trafic. Avant de décrire l'architecture globale du modèle, nous présentons tous les éléments théoriques de notre approche.

Sommaire

4.1	Principe du moindre effort	52
4.2	Formulation du problème	53
4.2.1	Mesures dynamiques	55
4.2.2	Introduction au module de trafic et aux interactions entre agents	56
4.2.3	Déplacement de ressource en ressource : introduction au moteur physique	58
4.3	Présentation schématique du modèle	60
4.3.1	Influence et réaction	60
4.3.2	Module de trafic	61
4.4	Heuristique de mise à jour dynamique d'itinéraire	64
4.4.1	Principe général des méthodes taboues	66
4.4.2	Notre proposition	68
4.4.3	Exemple d'exécution	73
4.5	Synthèse : potentiel du modèle MIM	79

4.1 Principe du moindre effort

Nous avons vu dans la section 3.3 comment Guy *et al.* (2010a) déduisent la formule (4.1) pour expliciter l'énergie métabolique dépensée par un piéton en fonction de son déplacement :

$$dE = dE_{debout} + dE_{marche} \quad (4.1)$$

Avec

$$\begin{cases} dE_{debout} = mass \cdot e_{debout} \cdot dt \\ dE_{marche} = mass \cdot e_{marche} \cdot |\nu(t)|^2 \cdot dt \end{cases}$$

Kapadia *et al.* (2011) étendent cette formule en (4.2) pour inclure une dépense énergétique proportionnelle à l'intensité de la collision pour un piéton en situation de collision ($dE_{collision}$) :

$$dE = dE_{debout} + dE_{marche} + dE_{collision} \quad (4.2)$$

Avec

$$\begin{cases} dE_{debout} = mass \cdot e_{debout} \cdot dt \\ dE_{marche} = mass \cdot e_{marche} \cdot |\nu(t)|^2 \cdot dt \\ dE_{collision} = mass \cdot e_{collision} \cdot c_p(t) \end{cases}$$

Ici, $c_p(t)$ désigne l'intensité²¹ de la collision à l'instant t et $e_{collision} = 10 \frac{J}{kg \cdot m \cdot s}$ est un facteur constant.

Nous formulons notre problème relativement à l'équation (4.2). Nos piétons chercheront à minimiser cette mesure d'énergie en interagissant avec leur entourage et en adaptant leurs déplacements en conséquence.

4.2 Formulation du problème

Pour mettre en œuvre le déplacement, nous supposons un espace 2D, discrétisé en un réseau de mailles contiguës²² que nous appelons *ressources de navigation*. Les ressources de navigation sont utilisées par les agents pour construire les itinéraires qui leur permettent d'atteindre leurs destinations — nous supposons que ces ressources sont de forme *triangulaire*. Même-ci en principe d'autres formes géométriques peuvent être choisies (exemple : carré, hexagone, etc.), le choix de la triangulation procure un double avantage qu'il est important de mentionner :

1. La triangulation garantie de recouvrir tout l'espace navigable quelque-soit sa topologie.
2. Il est possible de contrôler la taille des triangles en réutilisant des algorithmes de triangulation bien connus dans le domaine de la géométrie computationnelle (De Berg *et al.*, 2008) (exemple : triangulation de Delaunay), et dont plusieurs implémentations sont disponibles à travers des logiciels libres d'accès (Recast, Freefem++, etc.). Comme nous le verrons plus loin (section 4.4), une représentation fine et continue de l'espace nous permet de mieux déployer nos algorithmes de déplacements.

Nous introduisons les notations suivantes (voir figure 4.1) :

- \mathcal{R} : ensemble (ou réseau) de ressources.
- $M \in r$: le point M est à l'intérieur du contour délimité par la ressource r .
- $r_j \in v(r_i)$, où $v(r_i)$ correspond aux ressources voisines de r_i au sens topologique : r_i et r_j sont voisines dans le réseau. Une ressource peut avoir au maximum trois ressources voisines.
- $c_{AB} = (r_i)_{1 \leq i \leq k}$, $r_i \in \mathcal{R}$: itinéraire allant d'un point A à un point B et constitué d'une suite de k ressources. Les ressources r_i d'un itinéraire allant de A à B satisfont

21. L'intensité de la collision s'exprime en *mètres*. Elle est comprise comme une distance de pénétration qui est proportionnelle à la violence du choc.

22. Ici, nous considérons que deux mailles sont contiguës si et seulement si elles ont un côté en commun.

les trois contraintes :

$$\begin{cases} A \in r_1 \\ B \in r_k \\ r_i \in v(r_{i-1}), \forall 1 < i \leq k \end{cases} \quad (4.3)$$

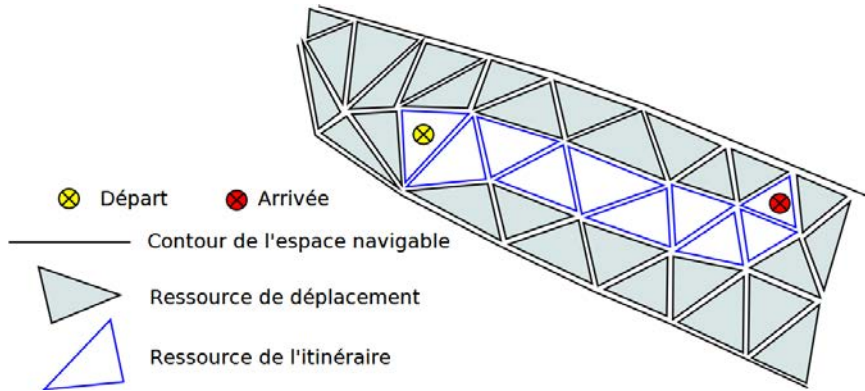


FIGURE 4.1 – Structure topologique de l'environnement : notions de ressource et d'itinéraire

La structure spatiale que nous définissons nous permet de déduire un graphe orienté dont les sommets sont matérialisés par les ressources, et les arcs, par les paires de ressources contiguës. C'est ce graphe qui permet aux agents de planifier leurs itinéraires (voir figure 4.2). Chaque agent évalue dynamiquement les arcs du graphe en fonction de son entourage, de ses paramètres individuels, et relativement à sa tâche : la valeur $coût(r_i, r_j)$ d'un arc (r_i, r_j) à un instant donné correspond à l'estimation de la quantité d'énergie métabolique que l'agent dépenserait pour un déplacement partant de la ressource r_i , à cet instant, jusqu'à la ressource r_j .

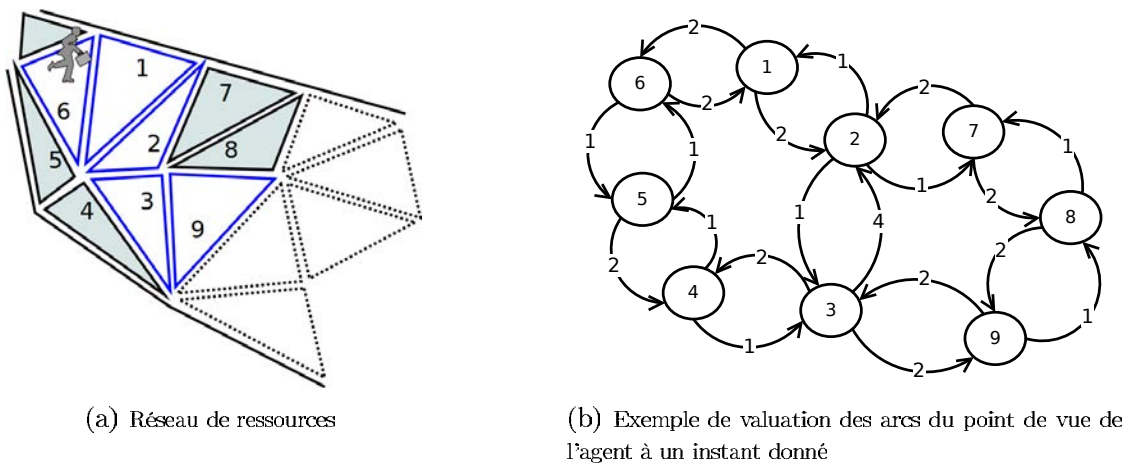


FIGURE 4.2 – Le graphe orienté de la figure (b) est extrait de la structure topologique de la figure (a).

Une première formalisation du problème de déplacement entre un point A et un point B peut alors s'énoncer comme le problème d'optimisation suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Suivre :} \\ \qquad c_{AB} = (r_i)_{1 \leq i \leq k}, r_i \in \mathcal{R} \\ \text{Tel que :} \\ \qquad \min \sum_{i=2}^{i=k} \text{coût}(r_{i-1}, r_i) \end{array} \right. \quad (4.4)$$

4.2.1 Mesures dynamiques

Pour expliciter le calcul du coût d'un arc (r_i, r_j) , nous nous inspirons de la formule (4.2) et nous en déduisons une discrétisation pour un déplacement allant d'une ressource r_i à sa voisine r_j . Nous posons :

- W_{r_i, r_j} , le temps d'arrêt moyen imposé par la congestion avant d'entamer le déplacement de r_i à r_j .
- S_{r_i, r_j} , la durée moyenne du déplacement de r_i à r_j , en excluant les temps d'arrêt.
- D_{r_i, r_j} , la durée totale moyenne du déplacement de r_i et r_j en incluant le temps d'arrêt, $D_{r_i, r_j} = S_{r_i, r_j} + W_{r_i, r_j}$.
- q_{r_i} , la fréquentation moyenne d'une ressource r_i .
- v_{r_i, r_j} , la vitesse moyenne de déplacement entre r_i et r_j .

En estimant le nombre de collisions éventuelles pour un déplacement allant de r_i à r_j par $q_{r_i} + q_{r_j}$ (qui représente une majoration du nombre de collisions éventuelles pour un déplacement allant de r_i à r_j), nous déduisons la formule (4.5) :

$$\text{coût}(r_i, r_j) = \Delta_{r_i, r_j} E_{debout} + \Delta_{r_i, r_j} E_{marche} + \Delta_{r_i, r_j} E_{collision} \quad (4.5)$$

$$\text{Avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta_{r_i, r_j} E_{debout} = mass \cdot e_{debout} \cdot (W_{r_i, r_j} + S_{r_i, r_j}) \\ \Delta_{r_i, r_j} E_{marche} = mass \cdot |v_{r_i, r_j}|^2 \cdot e_{marche} \cdot S_{r_i, r_j} \\ \Delta_{r_i, r_j} E_{collision} = mass \cdot (W_{r_i, r_j} + S_{r_i, r_j}) (q_{r_i} + q_{r_j}) e_{collision} \end{array} \right.$$

Remarquons que cette formule est similaire à la formule (4.2) en termes de contributions énergétiques :

- $\Delta_{r_i, r_j} E_{debout}$ représente l'énergie dépensée entre r_i et r_j indépendamment du mouvement. Cette dépense est proportionnelle au temps total passé en déplacement (y compris le temps d'arrêt du à la congestion), à savoir $D_{r_i, r_j} = S_{r_i, r_j} + W_{r_i, r_j}$
- $\Delta_{r_i, r_j} E_{marche}$ représente l'énergie dépensée expressément par le mouvement entre r_i et r_j . Cette énergie est fonction de la vitesse moyenne prise entre r_i et r_j et du temps passé en mouvement S_{r_i, r_j} .

- $\Delta_{r_i, r_j} E_{collision}$ représente l'énergie due aux collisions entre r_i et r_j . Cette énergie est fonction du nombre total de collisions et du temps total passé en déplacement $D_{r_i, r_j} = S_{r_i, r_j} + W_{r_i, r_j}$. Ici nous simplifions la formule (4.2) en supposant que le nombre de collisions est proportionnel à la fréquentation moyenne sur les deux ressources et que l'intensité de la collision est constante²³.

S_{r_i, r_j} , W_{r_i, r_j} , D_{r_i, r_j} , v_{r_i, r_j} et q_{r_i} sont des *mesures dynamiques* que l'agent estime en interagissant avec son entourage et en tenant compte de ses paramètres individuels. Dans la section suivante, nous proposons des formulations explicites de ces mesures.

4.2.2 Introduction au module de trafic et aux interactions entre agents

Nous argumentons qu'il existe une analogie entre le trafic à l'intérieur d'une ressource de déplacement — les entrées et sorties des agents — et le phénomène stochastique de file d'attente. Une file d'attente se crée à chaque fois que des unités (clients) souhaitent obtenir un service d'un producteur (serveur) de capacité limitée. Il est possible de prédire les temps de service, les temps d'attente, ainsi que la politique de service du producteur, si les lois de probabilités sur les instants d'arrivée et de sortie sont connues (Zukerman, 2008). Nous justifions cette analogie grâce aux parallèles possibles entre :

- les unités et les agents,
- le producteur et la ressource,
- le service fourni et le déplacement vers une ressource voisine

En supposant qu'une entité «**o**» observe le trafic au sein de chaque ressource en direction de ses ressources voisines, il est possible de déduire les mesures dynamiques qui nous intéressent, relativement à l'observateur «**o**», en reprenant deux propriétés empiriques issues de la théorie des files d'attente, à savoir :

1. Le temps moyen de service est égal à l'inverse de la fréquence de départ :

$$S_{r_i, r_j}^o = \frac{1}{\mu_{r_i, r_j}^o} \quad (4.6)$$

$$v_{r_i, r_j}^o = \frac{L_{r_i, r_j}}{S_{r_i, r_j}^o} \quad (4.7)$$

2. D'après la loi de Little (Zukerman, 2008, p. 85), la durée totale moyenne de trajet

23. Dans le terme $E_{collision}$ nous aurions pu rajouter un facteur en *mètre* qui traduirait la valeur de l'intensité de collision, mais nous omettons volontairement de le faire pour ne pas surcharger la notation.

est le quotient de la fréquentation moyenne par la fréquence d'arrivée :

$$D_{r_i, r_j}^o = \frac{q_{r_i}^o}{\lambda_{r_i, r_j}^o} \quad (4.8)$$

Ici, λ_{r_i, r_j}^o et μ_{r_i, r_j}^o représentent respectivement la fréquence d'arrivée et la fréquence de départ des agents se déplaçant de r_i à r_j ; $q_{r_i}^o$ est la fréquentation moyenne à l'intérieur de la ressource r_i , et L_{r_i, r_j} désigne la longueur de l'arc (r_i, r_j) . L'exposant «o» signifie que la mesure est estimée relativement à l'observateur.

À ce niveau, un parallèle pourrait se faire entre «o» et un agent pour exprimer les mesures dynamiques relativement à l'agent. Cependant, dans une perspective de simulation multi-agents en temps réel, ce choix peut être coûteux en terme de mémoire et handicapant pour le passage à l'échelle. C'est pourquoi nous introduisons plutôt une unique instance d'un *module de trafic*, défini par l'environnement, qui sera chargée d'observer les arrivées et départs des agents dans chacune des ressources. Les agents interagissent entre eux via le module de trafic en lui envoyant des notifications lorsqu'ils entrent ou sortent d'une ressource. Ces notifications sont ensuite historisées par le module de trafic, qui en déduit des lois de probabilités sur les instants d'arrivée et de sortie des agents pour les différentes ressources parcourues. Les agents accèdent à ces informations pour les ressources situées dans leur *champ de perception*, et utilisent les formules (4.9) et (4.10) pour les interpréter relativement à leurs tâches et en tenant compte de leurs paramètres individuels :

$$q_{r_i} = q_{r_i}^o \quad (4.9)$$

$$M_{r_i, r_j} = M_{r_i, r_j}^\perp + \frac{q_{r_i} + q_{r_j}}{2 \cdot q_{max}} \cdot \left(M_{r_i, r_j}^o - M_{r_i, r_j}^\perp \right) \quad (4.10)$$

Où :

- q_{max} est le nombre maximal d'agents que peut contenir une ressource.
- M_{r_i, r_j} représente une mesure dynamique quelconque parmi D_{r_i, r_j} , S_{r_i, r_j} , W_{r_i, r_j} , et v_{r_i, r_j} , estimée du point de vue de l'agent.
- M_{r_i, r_j}^o est l'équivalent de M_{r_i, r_j} du point de vue du module de trafic.
- M_{r_i, r_j}^\perp est la valeur de M_{r_i, r_j} calculée par l'agent en tenant uniquement compte de ses paramètres individuels et de la topologie.

En posant V_{r_i, r_j}^{pref} , la vitesse désirée de l'agent pour aller de r_i à r_j , nous pouvons déduire (4.11), (4.12) et (4.13) :

$$D_{r_i, r_j}^\perp = \frac{L_{r_i, r_j}}{V_{r_i, r_j}^{pref}} \quad (4.11)$$

$$S_{r_i, r_j}^\perp = D_{r_i, r_j}^\perp \quad (4.12)$$

$$v_{r_i, r_j}^\perp = V_{r_i, r_j}^{pref} \quad (4.13)$$

Remarquons que la formule (4.10) modélise intuitivement deux faits très importants :

1. Plus le trafic est dense, plus la mesure M_{r_i, r_j} est macroscopique et tend vers M_{r_i, r_j}^o
2. Moins le trafic est dense, plus la mesure M_{r_i, r_j} est microscopique, i.e individuelle à l'agent, et tend vers M_{r_i, r_j}^\perp

Notons qu'il est possible d'envisager plusieurs *modules de trafic* qui seraient répartis géographiquement dans l'espace navigable. Dans ce cas, chaque *instance* de module de trafic serait en charge d'observer le trafic dans une zone qui lui serait attribuée. Cette disposition permettrait d'optimiser l'historisation des notifications dans un environnement dense et de grande taille.

Les formules (4.6), (4.7), (4.8), (4.9), (4.10), (4.11), (4.12) et (4.13) clarifient la formalisation du **calcul de l'itinéraire** à suivre. Dans la section suivante, nous abordons le problème de **suivi d'itinéraire**. Nous explicitons la notion d'influence et nous introduisons un *moteur physique*, chargé de faire évoluer le corps des agents dans l'environnement en fonction de lois d'écoulement et des influences produites par les agents.

4.2.3 Déplacement de ressource en ressource : introduction au moteur physique

Pour atteindre sa destination, un agent se déplace de ressource en ressource en appliquant des *influences* sur son corps. Ces influences représentent des *tendances de déplacement* que l'agent déduit de son itinéraire et de son voisinage. Les influences sont ensuite traduites en déplacements élémentaires par un *moteur physique* suivant un ensemble de lois décrivant la dynamique du déplacement des piétons. Ci-après, nous décrivons le calcul d'influence (réalisé par l'agent), et la traduction d'une influence en déplacement élémentaire (réalisé par le moteur physique).

Calcul d'influence

Une influence $\overrightarrow{\gamma_{r_i, r_{i+1}}}$, générée par un agent pour aller de la ressource r_i à la ressource r_{i+1} de son itinéraire, est un vecteur vitesse que l'agent déduit de sa **vitesse désirée** $\overrightarrow{V_{r_i, r_{i+1}}^{pref}}$. La vitesse désirée $\overrightarrow{V_{r_i, r_{i+1}}^{pref}}$ représente ici le déplacement que l'agent effectuerait pour aller de r_i à r_{i+1} en l'absence d'obstacles. Le norme de $\overrightarrow{V_{r_i, r_{i+1}}^{pref}}$ est un paramètre individuel à l'agent et l'orientation est calculé à partir de l'itinéraire courant. La figure 4.3 illustre le calcul de l'orientation de ces vitesses désirées.

Dans notre modèle, $\overrightarrow{\gamma_{r_i, r_{i+1}}}$ désigne la vitesse la plus proche de $\overrightarrow{V_{r_i, r_{i+1}}^{pref}}$ parmi les vitesses admissibles, i.e les vitesses qui permettent à l'agent, suivant ses perceptions, d'éviter les collisions avec son voisinage. Nous ne négligeons donc pas l'évitement de collisions, au contraire, nous clarifions le cadre formel suivant lequel nous le prenons en compte. Notre formulation supprime l'ambiguïté, justement mentionnée par certaines critiques à l'encontre des modèles microscopiques (Treuille *et al.*, 2006), entre la planification de chemin, le suivi de chemin et l'évitement de collisions.

Le paradigme des V-Obstacles, comme nous avons pu le voir dans les travaux de Van Den Berg *et al.* (2010), se prête bien à notre formulation. Rappelons que suivant ce paradigme, une action de déplacement consiste à choisir une vitesse de déplacement parmi un ensemble de vitesses de déplacement admissibles. Dans notre modèle, le déplacement de ressource en ressource s'appuie sur le même principe, sauf que dans notre approche, nos agents calculent plutôt des influences et non des vitesses instantanées. Cela nous permet d'introduire un moteur physique chargé d'appliquer le mouvement à partir des influences générées par les agents, et ainsi de concrétiser le fait que le mouvement d'un agent se réalise suivant des lois d'écoulement qui sont extérieures à son comportement.

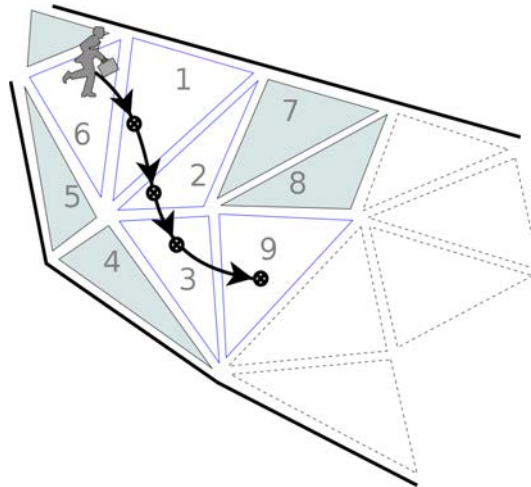


FIGURE 4.3 – Vitesses désirées de l'agent (les influences sont générées à partir de ces vitesses désirées)

Traduction d'une influence en déplacement élémentaire

La conversion d'une influence en déplacement élémentaire est ensuite assurée par l'environnement, conformément à la théorie de l'action dont nous nous inspirons pour notre modèle (voir section 3.6). Nous introduisons un unique *moteur physique* pour tout le système, qui prescrit la manière dont évolue le corps d'un agent. Pour traduire une influence

en déplacement élémentaire et déterminer ainsi la nouvelle position d'un agent dans l'environnement, le moteur physique prend en compte non seulement l'influence produite par l'agent, mais aussi les influences produites par les autres agents situés dans son voisinage, qu'ils soient perçus ou non. De cette façon, notre modèle est compatible avec les déplacements qu'un agent pourrait subir sans les avoir explicitement décidés (chocs, bousculades, etc.). Nous préservons ainsi la dynamique de l'écoulement du trafic sans compromettre l'autonomie des agents.

Plusieurs solutions techniques permettant d'implémenter un moteur physique existent dans la littérature — exemple : Bullet Physics (Coumans, 2008), Box2D²⁴. Aussi ne proposons-nous pas de nouveau modèle explicite (dans notre implémentation, nous utilisons Box2D). Nous supposons juste que la nature d'une influence est un vecteur vitesse, et que le moteur physique traduit cette vitesse en déplacement élémentaire, i.e. en vitesse instantanée, en tenant compte de lois d'écoulement. La nouvelle position calculée par le moteur est ensuite utilisée par l'agent pour notifier son déplacement au *module de trafic*, comme nous l'avons évoqué dans la section 4.2.2, et pour réajuster son itinéraire courant²⁵.

4.3 Présentation schématique du modèle

Deux principaux composants émergent de notre formulation (section 4.2) : l'environnement, qui définit un module de trafic et un moteur physique ; les agents, qui définissent des algorithmes de génération et d'application d'influences ainsi que des algorithmes de recherche et de réajustement d'itinéraire. La figure 4.4 donne un aperçu de la structure de chaque composant et des interactions qui existent entre eux. Dans cette section, nous décrivons en détail les relations entre composants.

4.3.1 Influence et réaction

Dans notre modèle, un agent est composé d'un module de délibération et d'un corps. La figure 4.5 illustre le déroulement d'un déplacement élémentaire de la génération d'influence jusqu'au réajustement de l'itinéraire par l'agent en précisant les estampilles temporelles pour chaque étape. Le module de délibération de l'agent a pour rôle de générer

24. www.box2d.org

25. Ne pas confondre le réajustement d'itinéraire avec la mise à jour dynamique (ou recherche) d'itinéraire. Le réajustement permet à l'agent de rectifier l'itinéraire qu'il suit en fonction de sa nouvelle position. Il est effectué immédiatement après le calcul de la nouvelle position par le moteur physique.

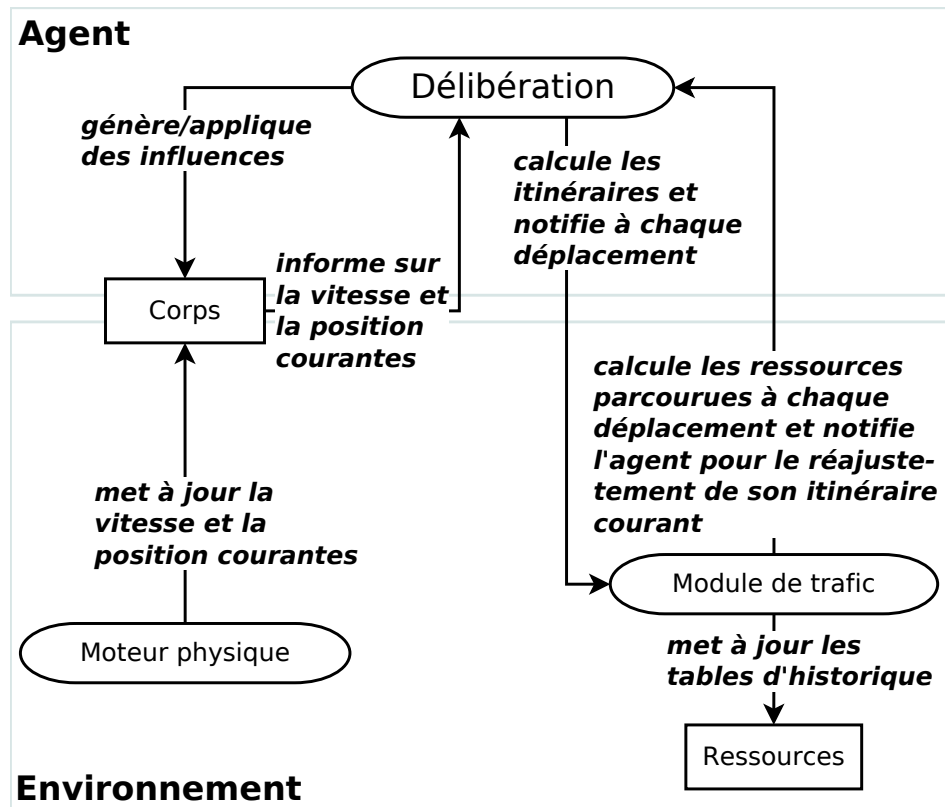


FIGURE 4.4 – Structure générale du modèle montrant les interactions entre les différents composants

des influences (figure 4.5(a)) sur le corps en fonction d'un itinéraire qu'il maintient à jour. Ces influences sont ensuite transformées en mouvement par le moteur physique (figure 4.5(b)), comme nous l'avons vu dans la section précédente. Après transformation, le module de délibération notifie le module de trafic avec les ancienne et nouvelle positions (figure 4.5(c)), puis réajuste son itinéraire en fonction des ressources parcourues au cours de son déplacement en vue de la prochaine phase d'influence (figure 4.5(d)).

L'algorithme 1 résume l'activité du module de délibération.

Signalons qu'un agent peut effectuer plusieurs déplacements élémentaires à l'intérieur d'une même ressource. Dans ce cas, l'ensemble des ressources parcourues est constitué d'une seule ressource, à savoir, la ressource courante de l'agent.

4.3.2 Module de trafic

Afin d'assurer la maintenance des mesures dynamiques en temps réel, plus précisément de leurs composantes macroscopiques (voir section 4.2.1), nous définissons des tables d'historiques de taille fixe pour chaque ressource du réseau et pour chacun de ses arcs sortants.

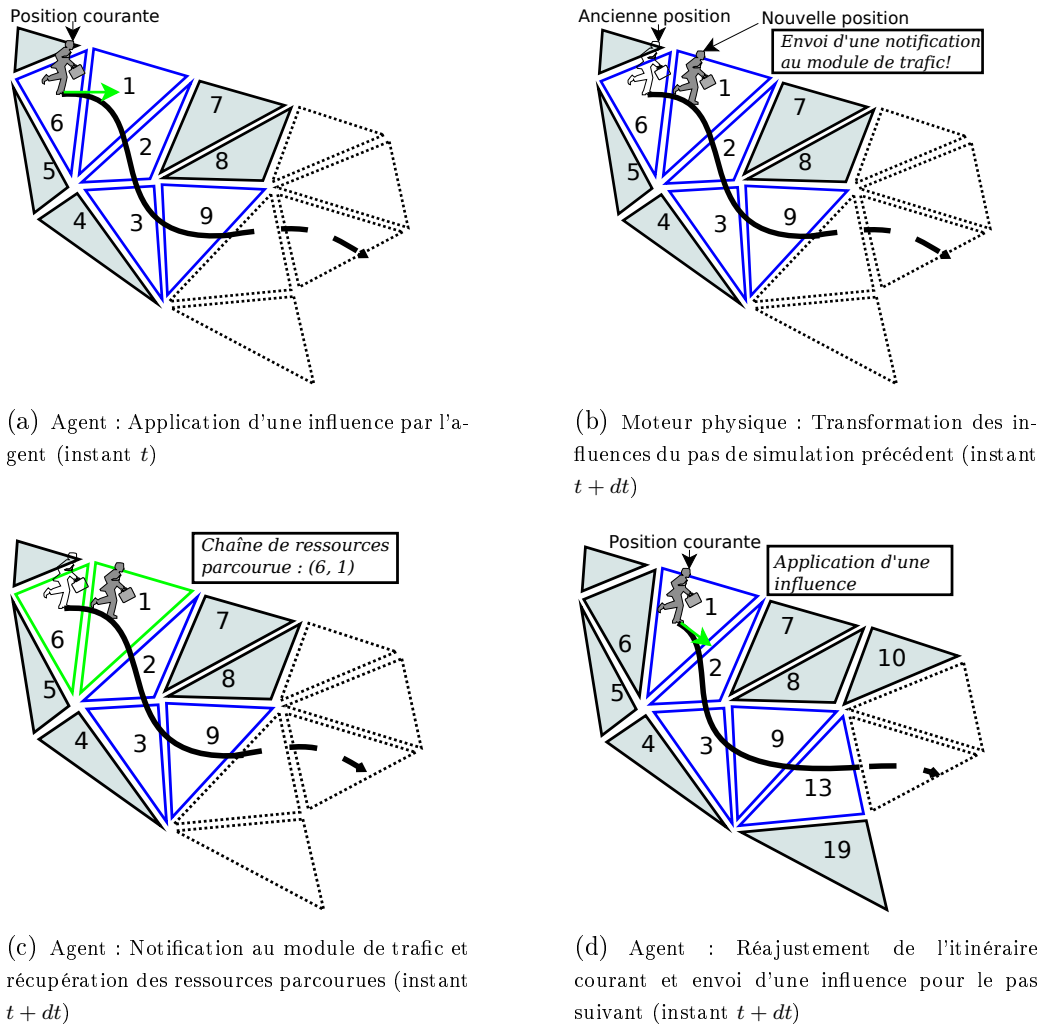


FIGURE 4.5 – Exécution d'un déplacement élémentaire. Le pas de simulation est représenté par la variable t

Les données contenues dans ces tables permettent de rendre compte du trafic à l'intérieur d'une ressource et en direction de ses ressources voisines. Nous définissons deux principaux types de table d'historique :

1. Les **historiques de fréquentation**, à partir desquels la fréquentation moyenne des ressources pourra être calculée — un historique de fréquentation est associé à chaque ressource.
2. Les **historiques de transition**, à partir desquels seront déduites les fréquences d'arrivée et de départ — un historique de transition est associé à chacun des arcs sortants d'une ressource.

La maintenance des tables d'historique est assurée par le module de trafic et se fait suivant un pas d'historisation propre que nous représentons par la variable t_H . La durée

Données : pos : position courante ; c : itinéraire courant ; $Prefs(c)$: Liste des vitesses préférées calculées à partir de l'itinéraire courant ; $Neigh$: Voisinage immédiat de l'agent suivant ses perceptions ;

- 1 récupérer la position pos^{new} calculée par le moteur physique ;
- 2 notifier le module de trafic avec (pos, pos^{new}) pour récupérer les ressources parcourues ;
- 3 mettre à jour c en fonction des ressources parcourues ;
- 4 $pos \leftarrow pos^{new}$;
- 5 mettre à jour $Prefs(c)$;
- 6 sélectionner la première vitesse \vec{V}_{pref} de $Prefs(c)$;
- 7 $\gamma \leftarrow$ vitesse la plus proche de \vec{V}_{pref} permettant d'éviter $Neigh$;
- 8 Appliquer γ ;

Algorithme 1 : Exécution d'un déplacement élémentaire

d'un pas d'historisation est notée dt_H . À chaque pas d'historisation t_H , les notifications déduites du déplacement des agents, sous forme de chaînes de ressources parcourues, permettent au module de trafic d'identifier les ressources dont les tables de fréquentation ou de transition doivent être mises à jour. Les tables d'historique se comportent comme des fenêtres glissantes de taille prédéfinie dont les valeurs changent d'un pas d'historisation à l'autre en fonction des notifications reçues du déplacement des agents.

Illustrations de la mise à jour des tables d'historique. Soit une ressource r , contiguë à trois ressources. Comme nous l'avons vu plus haut, deux types de tables d'historique sont associées à r : la table de fréquentation F , et les tables de transition vers les trois ressources voisines, labellisées T et numérotées de 1 à 3. Supposons que les notifications reçues du déplacement des agents au pas d'historisation t_H signalent l'arrivée d'un premier agent, et que les notification reçues au pas suivant, $t_H + 2 \cdot dt_H$, signalent l'arrivée d'un deuxième agent. Considérons ensuite qu'au pas d'historisation $t_H + 3 \cdot dt_H$, les notifications reçues signalent le départ d'un agent via la ressource voisine numéro 1, et d'un autre, via la ressource voisine numéro 2. Si aucun autre agent ne traverse la ressource r après le pas d'historisation $t_H + 3 \cdot dt_H$, le remplissage des tables d'historique associées à la ressource r se fait d'après la figure 4.6. Pour cet exemple, la taille des tables est fixée à 4 éléments.

Pour résumer, en posant *Actives*, les ressources pour lesquelles le trafic est non nulle, i.e. les ressources pour lesquelles il existe des valeurs non nulles dans une des tables d'historique associées, le processus d'historisation se déroule d'après l'algorithme 2.

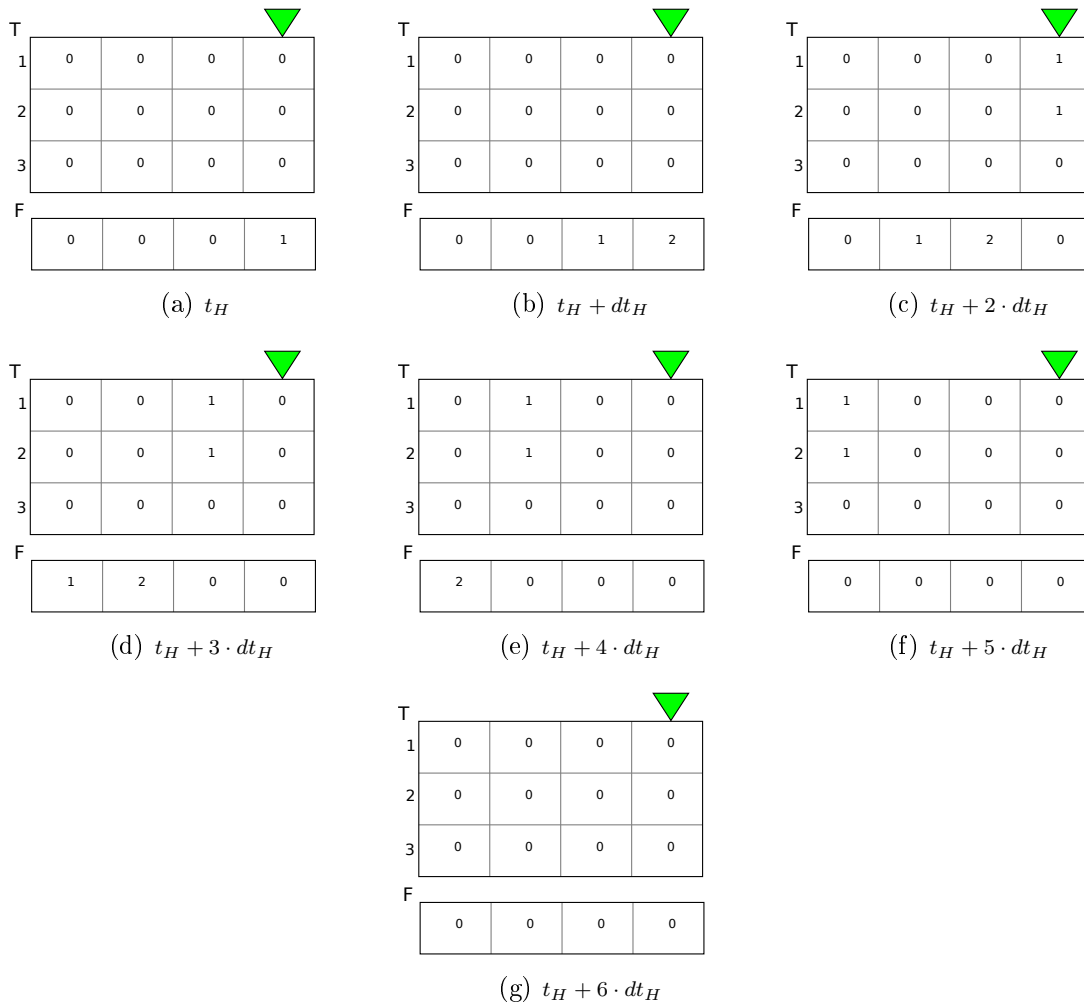


FIGURE 4.6 – Mise à jour des tables d'historique associées à une ressource r pour laquelle les notifications reçues du déplacement des agents signalent deux arrivées respectivement à t_H et $t_H + dt_H$, et deux départs respectivement via les ressources voisines numéro 1 et 2 à $t_H + 2 \cdot dt_H$

4.4 Heuristique de mise à jour dynamique d'itinéraire

Avant de décrire l'heuristique de mise à jour (ou recherche) dynamique d'itinéraire, nous tenons tout d'abord à nuancer la notion d'optimalité. Nous avons vu à la section 4.2 que le coût d'un itinéraire, varie en fonction du temps (concrètement, en fonction du pas d'historisation du module de trafic). Nous pensons donc que la recherche se doit d'être dynamique afin de garantir à chaque instant l'itinéraire le plus adapté. Cependant, il ne s'agit pas d'effectuer un calcul exact du meilleur itinéraire, ce qui est sans intérêt compte tenu de la dynamique du coût, mais plutôt de faire évoluer un itinéraire existant en fonction des conditions courantes du trafic. Nous optons donc pour une recherche de type évolutionniste, et plus particulièrement, pour des méta-heuristiques « taboues » (Glover

```

Données :
Actives : ressources actives
Notification : notifications du pas d'historisation courant (liste de chaines de
ressources)
1 pour chaque  $r \in \textit{Actives}$  faire
2   | mettre la valeur du pas d'historisation courant à 0 dans toutes les tables
   | d'historique de  $r$  ;
3 fin
4 pour chaque  $c \in \textit{Notifications}$  faire
5   | si  $|c| == 1$  alors                               /*  $c$  contient une seule ressource */
6   |   |  $r$  : unique ressource de  $c$ ;
7   |   |  $F(r)$  : historique de fréquentation de  $r$ ;
8   |   | incrémenter la valeur du pas d'historisation courant dans  $Q(r)$ ;
9   | sinon                                           /*  $c$  contient des liens  $(r_i, r_j)$  */
10  |   | pour chaque  $(r_i, r_j) \in c$  faire
11  |   |   |  $T^{r_j}(r_i)$  : historique de transition du lien  $(r_i, r_j)$ ;
12  |   |   |  $F(r_i)$  : historique de fréquentation de  $r_i$ ;
13  |   |   |  $F(r_j)$  : historique de fréquentation de  $r_j$ ;
14  |   |   | incrémenter la valeur du pas d'historisation courant dans  $T^{r_j}(r_i)$  ;
15  |   |   | décrémenter la valeur du pas d'historisation courant dans  $F(r_i)$  ;
16  |   |   | incrémenter la valeur du pas d'historisation courant dans  $F(r_j)$  ;
17  |   | fin
18  |   | finsi
19  |   | mettre à jour Actives;
20 fin
21 Rafraîchir Actives (i.e. ignorer les ressources dont les tables d'historique ne
contiennent que des valeurs nulles);

```

Algorithme 2 : Mise à jour des table d'historique de taille fixe

et Laguna, 1997) qui présentent des propriétés intéressantes pour la simulation en temps réel. En effet :

- la complexité de ces algorithmes dépend du voisinage de la solution courante et non de la taille l'environnement,
- ces algorithmes s'exécutent par itérations, et la qualité de la solution croît avec le nombre d'itérations autorisées,
- les itérations de l'algorithme sont individuellement très peu coûteuses en termes de ressources de calcul, ce qui rend l'approche taboue particulièrement attractive pour nous.

4.4.1 Principe général des méthodes taboues

Les méthodes taboues sont très souvent évoquées en recherche opérationnelle pour la résolution des problèmes qui se formulent comme des jeux de congestion dans le domaine du télé-traffic (Glover et Laguna, 1997). Elles fonctionnent toutes suivant un schéma de base qui se résume en trois points²⁶ :

1. calculer une solution initiale x_0 (grâce à un algorithme glouton). Définir une variable x^{best} comme *meilleure solution globale*, et x^* , comme *meilleure solution de l'itération courante*.
2. pour un nombre *ITER* d'itérations :
 - Sélectionner la meilleure solution x^* de l'itération précédente (x_0 si première itération). Définir x^* comme meilleure solution globale si $x^* > x^{best}$.
 - Faire évoluer x^* , en lui appliquant des mouvements élémentaires, afin de générer de nouvelles solutions non *taboues* issues du voisinage de x^* . Certaines solutions générées par les mouvements effectués à l'itération courante peuvent être considérées *taboues* pour les prochaines itérations suivant un critère de classification à définir au préalable. Cette disposition permet de diversifier la recherche et constitue le principal atout des heuristiques taboues.
 - Identifier la meilleure solution dans l'ensemble des solutions générées et itérer.
3. si une condition d'arrêt est déclenchée : renvoyer x^{best} .

La **portée d'exclusion** d'une solution taboue est le nombre d'itérations pour lequel la solution est inéligible pour la recherche. Le **critère d'aspiration** est la condition selon laquelle une solution peut être sélectionnée pour la recherche malgré qu'elle soit taboue. Les heuristiques taboues prévoient plusieurs types de conditions d'arrêt qui sont liées, entre autre, au nombre d'itérations, à la qualité de la solution, ou encore, au temps de calcul (Glover et Laguna, 1997).

Notre algorithme de recherche d'itinéraire s'inspire plus précisément des travaux de Casali *et al.* (2007), proposés pour l'optimisation de la commutation de paquets dans un réseau de télécommunications. Casali *et al.* (2007) présentent une heuristique taboue comme alternative aux algorithmes classiques de recherche de plus courts chemins – voir algorithme de Dijkstra (1959). Dans ces travaux, le réseau est représenté par un graphe (V, E) dans lequel l'ensemble des nœuds (V) représentent les postes de communication, et l'ensemble des arêtes (E) représentent les connexions entre les postes. Le poids des

²⁶. La description des heuristiques taboues que nous proposons dans cette section est entièrement inspirée de (Glover et Laguna, 1997).

arêtes est déterminé par la bande passante et le niveau de saturation de chaque connexion. L'heuristique part d'une solution existante qui ne contient pas de boucle et applique itérativement **trois types d'opérateurs** pour générer de nouvelles solutions (voir figures 4.7, 4.8, 4.9).

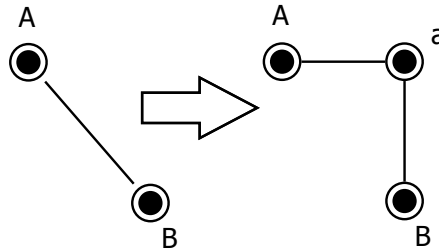


FIGURE 4.7 – Opérateur Op_1 : génère un nouveau chemin en remplaçant $\{A, B\}$ par $\{A, a\}, \{a, B\}$

Le premier opérateur Op_1 vérifie, pour chaque lien $\{A, B\}$ du chemin initial, s'il est possible de faire un détour en passant par un troisième nœud a , tel que $\{A, a\}, \{a, B\}$ (voir figure 4.7).

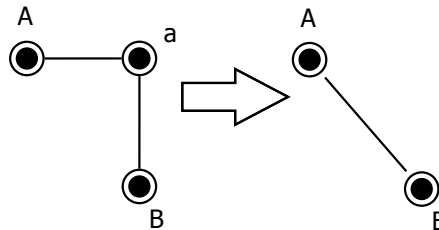


FIGURE 4.8 – Opérateur Op_2 : génère un nouveau chemin en remplaçant $\{A, a\}, \{a, B\}$ par $\{A, B\}$

Le deuxième opérateur Op_2 vérifie, pour une paire de liens connexes $\{A, a\}, \{a, B\}$ du chemin initial, s'il est possible de supprimer la connexion a en la remplaçant par un lien direct $\{A, B\}$ (voir figure 4.8).

Enfin, le troisième opérateur Op_3 vérifie, pour une paire de liens connexes $\{A, a\}, \{a, B\}$ du chemin initial, s'il est possible de remplacer la connexion a par une autre connexion b telle que $\{A, b\}, \{b, B\}$ (voir figure 4.9).

L'algorithme de recherche proposé par Casali *et al.* (2007) se déroule comme suit :

1. Calculer un itinéraire initial de taille n : $c = (r_i)_{1 \leq i \leq n}$.
2. Calculer le cout de c en sommant les poids de toutes les arêtes de c .

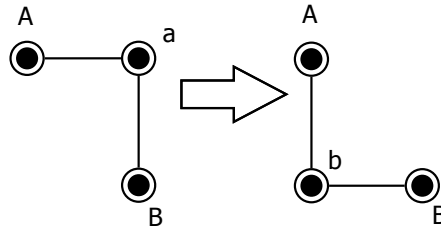


FIGURE 4.9 – Opérateur Op_3 : génère un nouveau chemin en remplaçant $\{A, a\}, \{a, B\}$ par $\{A, b\}, \{b, B\}$

3. Itération :

- en commençant par le premier nœud, vérifier si Op_1 est applicable pour chaque couple (r_i, r_{i+1}) , et si Op_2 et Op_3 sont applicables pour chaque triplet (r_i, r_{i+1}, r_{i+2}) . Si l'un des ces opérateurs est applicable, générer le *chemin voisin* correspondant et l'enregistrer dans une liste. Continuer les vérifications jusqu'à $i = n$.
- calculer le coût de tous les chemins qui ne sont pas dans la *liste des chemins tabous* – qui est initialement vide.
- ajouter le chemin courant et tous les chemins voisins générés dans la *liste des chemins tabous*.
- mettre à jour les variables x^{best} et x^* .
- répéter un certain nombre de fois (nombre d'itérations)

4.4.2 Notre proposition

Nous reprenons les grandes lignes de l'heuristique proposée par Casali *et al.* (2007), et nous l'appliquons à la recherche dynamique d'itinéraire dans notre réseau de ressources. Nous considérons que la recherche dynamique d'itinéraire part toujours d'un itinéraire existant pour le faire évoluer vers un itinéraire toujours plus économe en énergie métabolique, le tout premier itinéraire étant construit de manière gloutonne.

La **solution initiale** est la portion d'itinéraire qui peut faire l'objet d'une mise à jour, i.e. les ressources de l'itinéraire de l'agent pour lesquelles il perçoit la dynamique du trafic : nous la noterons $r_1 \dots r_n$. Ces ressources sont situées dans un champ de perception centré sur l'agent et délimité par ts_radius (voir figure 4.10).

Une **alternative** est une chaîne de ressources allant de r_1 à r_n , autre que la *solution initiale* – dans l'exemple de la figure 4.10, la chaîne de ressource $(\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{7}, \textcircled{8}, \textcircled{9})$ est une alternative possible à la solution initiale $(\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$.

La **solution courante**, au terme d'une itération, est l'alternative la moins coûteuse

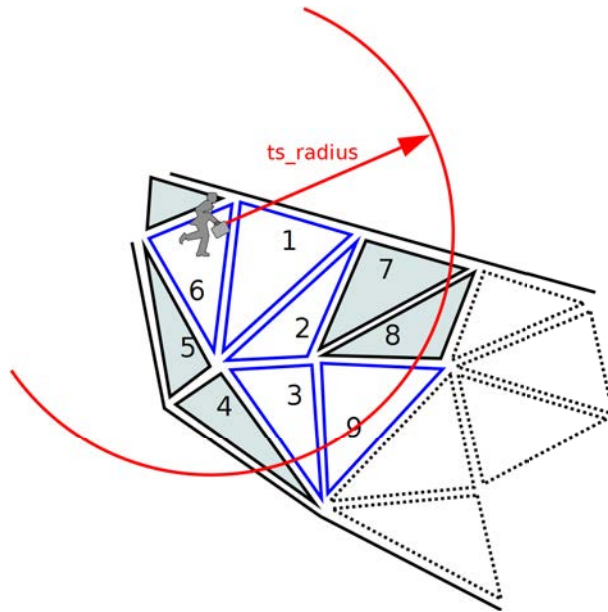


FIGURE 4.10 – Les ressources en clair représentent la solution initiale $x_0 = (r_1 = \textcircled{6}, r_2 = \textcircled{1}, r_3 = \textcircled{2}, r_4 = \textcircled{3}, r_5 = \textcircled{4})$. Il s'agit de la portion de l'itinéraire constitué de ressources pour lesquelles l'agent perçoit la dynamique du trafic. Ces ressources sont situées dans un champ de perception centré sur l'agent et délimité par ts_radius

parmi toutes les alternatives qui ont été générées au cours de l'itération. Si une itération ne produit aucune alternative, la solution courante reste identique à celle de l'itération précédente. Pour générer des alternatives au cours d'une itération, notre algorithme applique des *opérateurs génériques*, $OP_{r_i}^k$, sur des *chaînes élémentaires de ressources* de la solution courante. Le but des opérateurs génériques est d'explorer localement le voisinage de la solution courante pour générer des alternatives sans cycle.

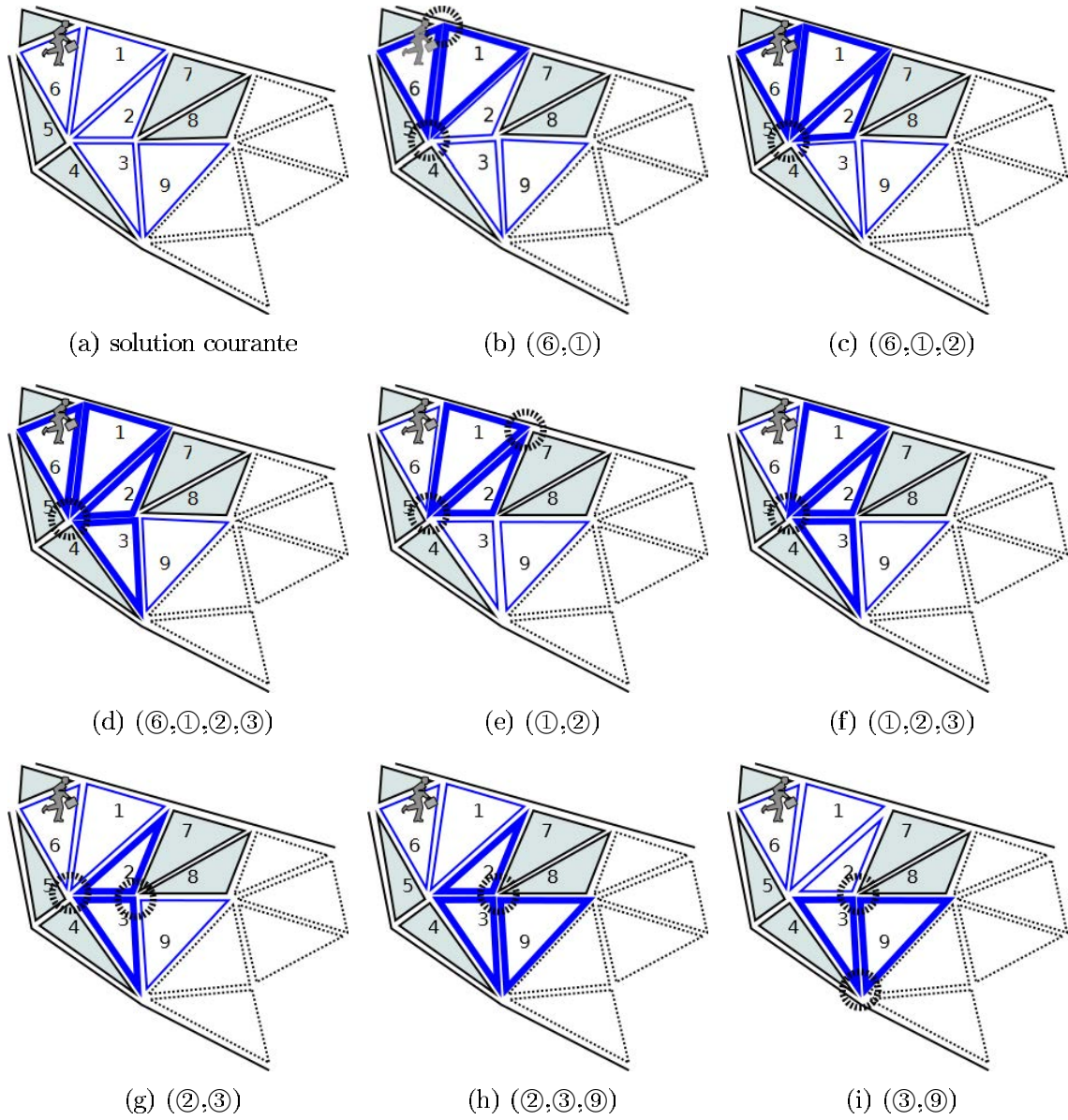


FIGURE 4.11 – Exemples de chaînes élémentaires de ressources

Une **chaîne élémentaire de ressources** est définie comme une chaîne où toutes les ressources ont au moins un même sommet en commun. Nous introduisons cette notion afin d'optimiser l'exploration du voisinage d'une solution. Générer une alternative reviendra à remplacer une chaîne élémentaire de ressources par une autre dans la solution courante. En effet, nous tenons à ce que la génération d'une alternative soit la moins coûteuse possible, en termes de ressources de calcul, afin de pouvoir faire évoluer une solution courante le plus rapidement possible, et ainsi, effectuer une recherche adaptée aux contraintes du temps réel.

Les **opérateurs** $OP_{r_i}^k$ sont définis comme suit :

- $r_i \dots r_{i+k}$, chaîne de ressources élémentaires sur laquelle s'applique l'opérateur
- k , taille de la chaîne.

Les opérateurs génériques $OP_{r_i}^k$ produisent des alternatives en remplaçant la chaîne de ressources élémentaires $r_i \dots r_{i+k}$, sur laquelle ils s'appliquent, par une autre chaîne de ressources élémentaire qui relie les mêmes extrémités r_i et r_{i+k} . La figure 4.11 montre quelques les chaînes élémentaires de ressources que l'on peut déduire de la solution de la figure 4.10.

Nous dirons qu'**une solution est taboue** au cours d'une itération donnée, si elle est entièrement constituée d'arcs tabous pour cette itération. **Un arc sera dit tabou** pour une itération donnée, si cet arc a été rajouté ou supprimé lors de la construction d'une alternative par un opérateur générique lors des itérations précédentes. Les paramètres ts_add et ts_remove représentent respectivement la portée d'exclusion d'un arc rajouté et celle d'un arc supprimé²⁷. En reprenant l'exemple de la figure 4.11(d) et en considérant que l'opérateur $Op_{r_1=\textcircled{6}}^3$ est appliqué à la première itération, les arcs $(\textcircled{6},\textcircled{5}),(\textcircled{5},\textcircled{4})$ et $(\textcircled{4},\textcircled{3})$ seront considérés tabous pour les ts_add prochaines itérations, car ils ont été *ajoutés* pour la génération de l'alternative $(\textcircled{6},\textcircled{5},\textcircled{4},\textcircled{3},\textcircled{9})$, tandis que les arcs $(\textcircled{6},\textcircled{1}),(\textcircled{1},\textcircled{2})$ et $(\textcircled{2},\textcircled{3})$ seront considérés tabous pour les ts_remove prochaines itérations, car ils ont été *supprimés* lors de la génération de l'alternative $(\textcircled{6},\textcircled{5},\textcircled{4},\textcircled{3},\textcircled{9})$.

Prévoir un traitement différent vis-à-vis des arcs rajoutés et supprimés donne plus de flexibilité à l'exploration. Notons qu'il est tout à fait envisageable d'affecter une portée d'exclusion identique pour les arcs ajoutés et supprimés. Le tableau 4.1 dresse la liste de tous les paramètres utilisés par notre algorithme de recherche d'itinéraire. Nous nous autoriserons à limiter le nombre d'itérations (ts_iter) de manière à contrôler le temps d'exécution de l'algorithme de recherche dynamique. Avec ce moyen de contrôle, l'algo-

²⁷. Pour cet exemple, nous signalons que les arcs tabous de la deuxième itération seraient tous les arcs rajoutés ou supprimés par l'ensemble de tous les opérateurs à la première itération, et pas seulement par $Op_{r_1=\textcircled{6}}^3$.

rithme sera capable de proposer des alternatives suffisamment intéressantes (en terme d'énergie métabolique) avec des temps de calcul raisonnables.

Tableau 4.1 – Paramètres utilisés par notre algorithme de recherche taboue

Paramètres	Description
ts_add	Nombre d'itérations pendant lesquelles un arc rajouté reste tabou
ts_remove	Nombre d'itérations pendant lesquelles un arc remplacé reste tabou
ts_radius	Rayon du champs de recherche (au delà de ce champ l'agent ne perçoit pas la dynamique du trafic au sein des ressources)
ts_iter	Nombre d'itérations à effectuer par recherche
ts_freq	Fréquence de planification (nombre de planification par temps de cycle)

Finalement, la recherche dynamique d'itinéraire se déroule d'après l'algorithme Tabou suivant :

1. Identifier la solution initiale : $x_0 = (r_i)_{1 \leq i \leq n}$. Il s'agit de la portion d'itinéraire pouvant faire l'objet d'une mise à jour, i.e. les ressources de l'itinéraire situées dans le champs de perception ts_radius . Initialiser x^{best} et x^* à x_0 .
2. Calculer le coût de x_0 en sommant les poids de toutes les arêtes de x_0 .
3. Pour ts_iter itérations :
 - Identifier les ressources $r_1 \dots r_n$ de la solution courante x^* .
 - À partir de r_1 , identifier toutes les chaînes de ressources élémentaires et appliquer les opérateurs correspondants pour générer des alternatives sans cycle et non taboues. Pour chaque alternative générée, marquer les arcs rajoutés comme tabous pour les ts_add prochaines itérations, et les arcs supprimés comme tabous pour les ts_remove prochaine itérations.
 - Identifier la meilleure alternative parmi les alternatives générées et mettre à jour x^* pour l'itération suivante.
 - Mettre à jour x^{best} si $x^* < x^{best}$.
 - Itérer.
4. retourner x^{best} .

4.4.3 Exemple d'exécution

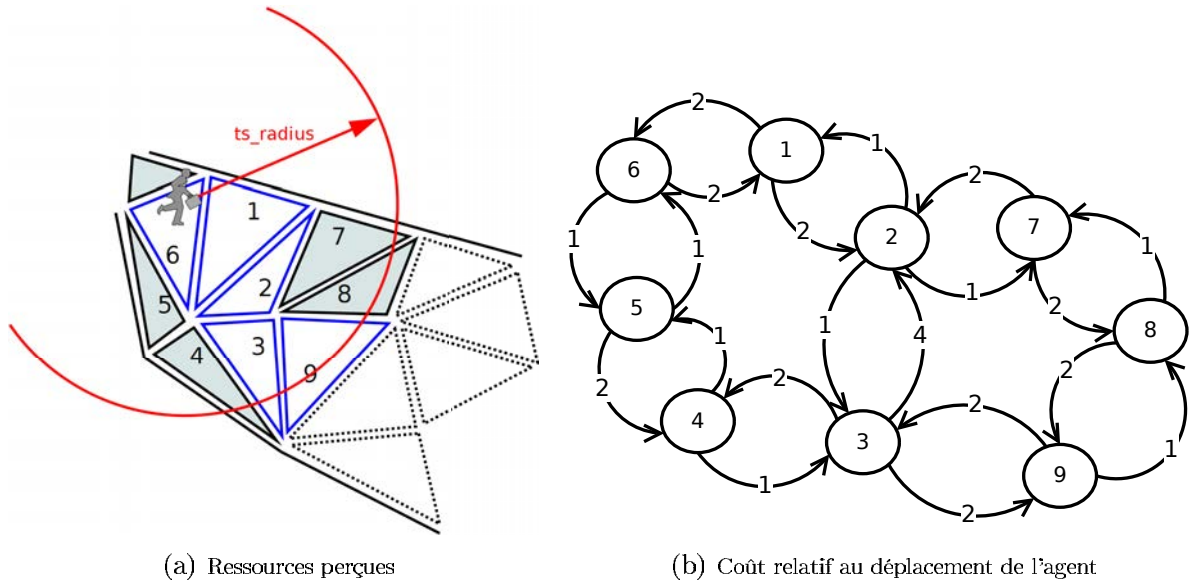


FIGURE 4.12 – Exemple d'exécution de l'algorithme de recherche taboue : illustration des ressources perçue par l'agent (a) et des coûts relatifs (b)

Nous illustrons le fonctionnement de notre algorithme de recherche à partir de l'exemple de la figure 4.12. Nous supposons que l'agent représenté sur la figure suit un itinéraire initial $(r_i)_{i \in \mathbb{N}}$. La portion de l'itinéraire qui peut être réajustée est celle qui est délimitée par le rayon de recherche de l'agent au moment de l'exécution de l'algorithme, soit ici $(r_1 = \textcircled{6}, r_2 = \textcircled{1}, r_3 = \textcircled{2}, r_4 = \textcircled{3}, r_5 = \textcircled{9})$. Les valeurs de ts_add et ts_remove sont fixées respectivement à 1 et 2.

Première itération

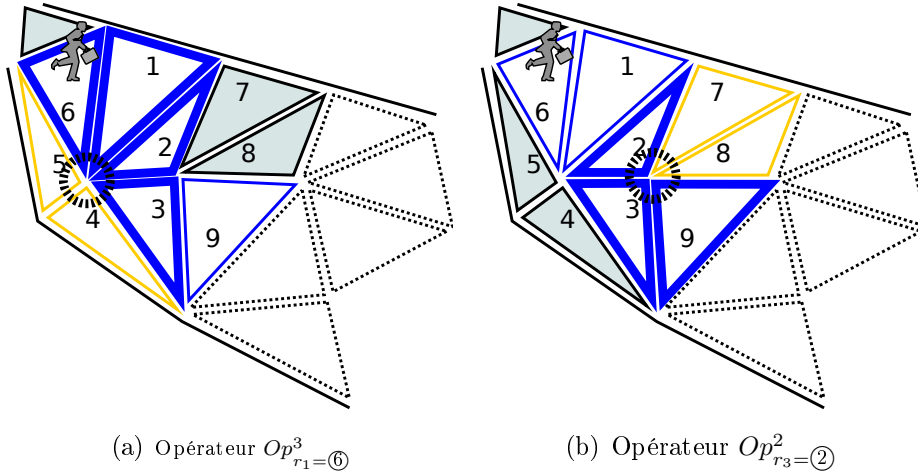


FIGURE 4.13 – Opérateurs de la première itération

La première itération part de la solution $(r_1 = \textcircled{6}, r_2 = \textcircled{1}, r_3 = \textcircled{2}, r_4 = \textcircled{3}, r_5 = \textcircled{9})$. Les seuls opérateurs qui génèrent des alternatives sans cycle (voir figure 4.13) sont $Op_{r_1=\textcircled{6}}^3$, qui génère $(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$, et $Op_{r_3=\textcircled{2}}^2$, qui génère $(\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{7}, \textcircled{8}, \textcircled{9})$. D'après le graphe de la figure 4.12(b), la solution $(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$ est la moins coûteuse. Elle est donc retenue comme solution courante. Le tableau 4.2 montre le récapitulatif de la première itération. L'exposant «*» signale la meilleure solution au terme de l'itération. Nous rappelons qu'au terme de la première itération, tous les arcs rajoutés seront considérés tabous pour la deuxième itération ($ts_add=1$) et les arcs supprimés, pour la deuxième et la troisième itération ($ts_remove=2$).

Tableau 4.2 – Récapitulatif de la première itération

Itération	1
x^*	$(\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$
x^{Best}	$(\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$
1	vide
2	vide
Opérateurs	$Op_{r_1=\textcircled{6}}^3, (r_{1+3=4} = \textcircled{3}) \rightarrow (\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})^*$ $Op_{r_3=\textcircled{2}}^2, (r_{3+2=5} = \textcircled{9}) \rightarrow (\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{7}, \textcircled{8}, \textcircled{9})$
Ajout	$(\textcircled{6}, \textcircled{5}), (\textcircled{5}, \textcircled{4}), (\textcircled{4}, \textcircled{3})$ $(\textcircled{2}, \textcircled{7}), (\textcircled{7}, \textcircled{8}), (\textcircled{8}, \textcircled{9})$
Suppression	$(\textcircled{6}, \textcircled{1}), (\textcircled{1}, \textcircled{2}), (\textcircled{2}, \textcircled{3}), (\textcircled{3}, \textcircled{9})$

Deuxième itération

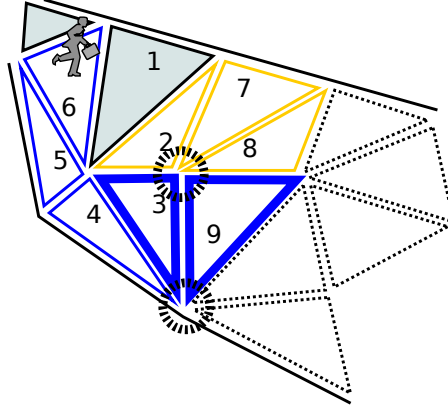


FIGURE 4.14 – Opérateur de la deuxième itération :

La deuxième itération part de la solution $(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$. Deux opérateurs génèrent des alternatives sans cycle. Il s'agit de $Op_{r_4=3}^1$ (voir figure 4.14), qui génère l'alternative $(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{2}, \textcircled{7}, \textcircled{8}, \textcircled{9})$ et $Op_{r_1=6}^3$, qui génère l'alternative taboue $(\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$ — les arcs qui la constituent sont tous tabous pour cette itération. Le tableau 4.3 récapitule le déroulement de la deuxième itération. L'exposant «^t» signale les alternatives taboues. Notons que pour simuler une portée limitée, la portée d'exclusion des arcs tabous est décrémentée à chaque fin d'itération.

Tableau 4.3 – Récapitulatif de la deuxième itération

Itération	2
x^*	$(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$
x^{Best}	$(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$
1	$(\textcircled{6}, \textcircled{5}), (\textcircled{5}, \textcircled{4}), (\textcircled{4}, \textcircled{3})$ $(\textcircled{2}, \textcircled{7}), (\textcircled{7}, \textcircled{8}), (\textcircled{8}, \textcircled{9})$
2	$(\textcircled{6}, \textcircled{1}), (\textcircled{1}, \textcircled{2}), (\textcircled{2}, \textcircled{3}), (\textcircled{3}, \textcircled{9})$
Opérateurs	$Op_{r_4=3}^1, (r_{4+1=5} = 9) \rightarrow (\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{2}, \textcircled{7}, \textcircled{8}, \textcircled{9})^*$ $Op_{r_1=6}^3, (r_{1+3=4} = 3) \rightarrow (\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{3}, \textcircled{9})^t$
Ajout	$(\textcircled{3}, \textcircled{2}), (\textcircled{2}, \textcircled{7}), (\textcircled{7}, \textcircled{8}), (\textcircled{8}, \textcircled{9})$
Suppression	$(\textcircled{3}, \textcircled{9})$

Troisième itération

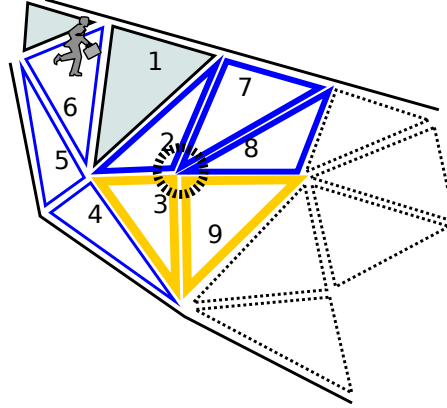


FIGURE 4.15 – Opérateur de la troisième itération

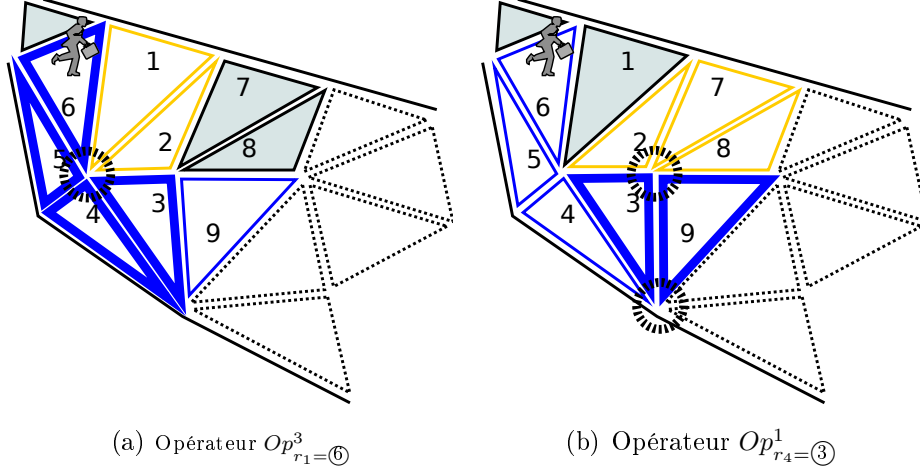
Pour la troisième itération (voir figure 4.15), les opérateurs qui génèrent des alternatives sans cycle sont $Op_{r_1=6}^4$ et $Op_{r_4=3}^4$. Seule l'alternative $(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$ générée par l'opérateur $Op_{r_4=3}^4$ est retenue, car tous les arcs de l'alternative $(\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{7}, \textcircled{8}, \textcircled{9})$ générée par $Op_{r_1=6}^4$ sont tabous pour cette itération. La solution courante est donc $(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$. Remarquons que cette solution avait déjà été sélectionnée au terme de la première itération. Le tableau 4.4 récapitule le déroulement de la troisième itération.

Tableau 4.4 – Récapitulatif de la troisième itération

Itération	3
x^*	$(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{2}, \textcircled{7}, \textcircled{8}, \textcircled{9})$
x^{Best}	$(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$
1	$(\textcircled{6}, \textcircled{1}), (\textcircled{1}, \textcircled{2}), (\textcircled{2}, \textcircled{3})$ $(\textcircled{3}, \textcircled{2}), (\textcircled{2}, \textcircled{7}), (\textcircled{7}, \textcircled{8}), (\textcircled{8}, \textcircled{9})$
2	$(\textcircled{3}, \textcircled{9})$
Opérateurs	$Op_{r_4=3}^4, (r_{4+4}=8 = \textcircled{9}) \rightarrow (\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})^*$ $Op_{r_1=6}^4, (r_{1+4}=5 = \textcircled{2}) \rightarrow (\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{7}, \textcircled{8}, \textcircled{9})^t$
Ajout	$(\textcircled{3}, \textcircled{9})$
Suppression	$(\textcircled{3}, \textcircled{2}), (\textcircled{2}, \textcircled{7}), (\textcircled{7}, \textcircled{8}), (\textcircled{8}, \textcircled{9})$

Quatrième itération

FIGURE 4.16 – Opérateurs de la quatrième itération



La quatrième itération est similaire à la deuxième en termes d'opérateurs qui génèrent des alternatives sans cycle (voir tableau 4.5) — seule la classification des solutions est différente. L'alternative $(\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$ générée par l'opérateur $Op_{r_1=6}^3$ peut être retenue comme solution courante car son coût est inférieur à celui de l'alternative $(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{2}, \textcircled{7}, \textcircled{8}, \textcircled{9})$ générée par l'opérateur $Op_{r_4=3}^1$, et qui n'est plus taboue pour cette itération.

Tableau 4.5 – Récapitulatif de la quatrième itération

Itération	4
x^*	$(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$
x^{Best}	$(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$
1	$(\textcircled{3}, \textcircled{9})$
2	$(\textcircled{3}, \textcircled{2}), (\textcircled{2}, \textcircled{7}), (\textcircled{7}, \textcircled{8}), (\textcircled{8}, \textcircled{9})$
Opérateurs	$Op_{r_4=3}^1, (r_{4+1}=5 = \textcircled{9}) \rightarrow (\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{2}, \textcircled{7}, \textcircled{8}, \textcircled{9})$ $Op_{r_1=6}^3, (r_{1+3}=4 = \textcircled{3}) \rightarrow (\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{3}, \textcircled{9})^*$
Ajout	$(\textcircled{6}, \textcircled{1}), (\textcircled{1}, \textcircled{2}), (\textcircled{2}, \textcircled{3})$
Suppression	$(\textcircled{3}, \textcircled{2}), (\textcircled{2}, \textcircled{7}), (\textcircled{7}, \textcircled{8}), (\textcircled{8}, \textcircled{9})$ $(\textcircled{6}, \textcircled{5}), (\textcircled{5}, \textcircled{4}), (\textcircled{4}, \textcircled{3}), (\textcircled{3}, \textcircled{9})$

Cinquième itération

La cinquième itération génère les mêmes alternatives que la première. Cependant, elles sont toutes taboues pour cette itération (voir tableau 4.6). Ici, aucune alternative ne peut être retenue comme solution courante. Le résultat de la quatrième itération est donc maintenu. Le tableau 4.6 récapitule le déroulement de la cinquième itération.

Tableau 4.6 – Récapitulatif de la cinquième itération

Itération	5
x^*	$(\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$
x^{Best}	$(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$
1	$(\textcircled{6}, \textcircled{1}), (\textcircled{1}, \textcircled{2}), (\textcircled{2}, \textcircled{3}), (\textcircled{3}, \textcircled{2})$ $(\textcircled{2}, \textcircled{7}), (\textcircled{7}, \textcircled{8}), (\textcircled{8}, \textcircled{9})$
2	$(\textcircled{6}, \textcircled{5}), (\textcircled{5}, \textcircled{4}), (\textcircled{4}, \textcircled{3}), (\textcircled{3}, \textcircled{9})$
Opérateurs	$Op_{r_1=6}^3, (r_{1+3=4} = \textcircled{3}) \rightarrow (\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})^t$ $Op_{r_3=2}^2, (r_{3+2=5} = \textcircled{9}) \rightarrow (\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{7}, \textcircled{8}, \textcircled{9})^t$
Ajout	vide
Suppression	vide

Sixième itération

Nous clôturons notre exemple avec la sixième itération. Par rapport à l'itération précédente, seule la portée des arcs tabous change. L'alternative $(\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{7}, \textcircled{8}, \textcircled{9})$ devient ici sélectionnable pour la recherche et peut être retenue comme solution courante. Le tableau 4.7 récapitule le déroulement de cette dernière itération.

Tableau 4.7 – Récapitulatif de la sixième itération

Itération	6
x^*	$(\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$
x^{Best}	$(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$
1	$(\textcircled{6}, \textcircled{5}), (\textcircled{5}, \textcircled{4}), (\textcircled{4}, \textcircled{3}), (\textcircled{3}, \textcircled{9})$
2	vide
Opérateurs	$Op_{r_1=6}^3, (r_{1+3=4} = \textcircled{3}) \rightarrow (\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})^t$ $Op_{r_3=2}^2, (r_{3+2=5} = \textcircled{9}) \rightarrow (\textcircled{6}, \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{7}, \textcircled{8}, \textcircled{9})^*$
Ajout	$(\textcircled{2}, \textcircled{7}), (\textcircled{7}, \textcircled{8}), (\textcircled{8}, \textcircled{9})$
Suppression	$(\textcircled{2}, \textcircled{3}), (\textcircled{3}, \textcircled{9})$

Au terme de la sixième itération, la meilleure solution globale reste $(\textcircled{6}, \textcircled{5}, \textcircled{4}, \textcircled{3}, \textcircled{9})$. Notons qu'il est possible de limiter le nombre d'itérations de l'algorithme via le paramètre ts_iter (voir tableau 4.1), et d'augmenter ou de diminuer la portée d'exclusion des arcs tabous.

4.5 Synthèse : potentiel du modèle MIM

Dans cette section nous présentons le potentiel de notre modèle par rapport à la problématique de crédibilité et de passage à l'échelle. Nous discutons également des originalités de notre modèle par rapport à l'existant.

Premièrement, notre approche s'appuie sur une formulation générique suivant laquelle les piétons sont des agents **situés** dans un environnement qui se déplace d'un point A à un point B en essayant de minimiser leur dépense énergétique — une économie du mouvement basée sur la régulation de la dépense énergétique est une garantie pour obtenir des comportements réalistes d'après plusieurs études en psychologie (cf. section 4.1).

Deuxièmement, nous exploitons le formalisme des jeux de congestion pour définir notre modèle et nous introduisons la notion de ressources de navigation. Les ressources de navigation sont utilisées par les agents pour construire leurs itinéraires et elles définissent des mesures dynamiques qui permettent aux agents d'apprécier leur dépenses de manière consistante sans négliger leurs paramètres individuels. Nous proposons un algorithme tabou pour implémenter la stratégie de déplacement des agents. Cet algorithme simule une recherche évolutionniste qui consiste à mettre à jour un itinéraire courant dans les limites du champ de perception de l'agent. Sa complexité est indépendante du nombre d'agents et peut être contrôlée via le nombre d'itérations autorisées. Le comportement des agents tient rigoureusement compte des interactions entre agents et est implémenté via un algorithme dont la complexité ne dépend pas du nombre d'agents. En cela, notre modèle possède de sérieux atouts en faveur de la crédibilité et du passage à l'échelle conjointement.

Troisièmement, les concepts issus du paradigme multi-agent que nous exploitons s'avèrent particulièrement adaptés pour appréhender la complexité de la simulation. L'environnement est vu comme un composant à part entière du système ontologiquement différent des agents — l'environnement maintient les mesures dynamiques qui rendent compte du trafic au sein des ressources ; l'environnement est également le garant des lois de la dynamique des objets physiques et coordonne le mouvement des agents. Une importante part de la dynamique de la simulation se trouve ainsi déléguée à l'environnement sans conséquence sur l'autonomie des agents. Cette séparation permet une implémentation rigoureuse du comportement, et de surcroît, la parallélisation des calculs.

Pour finir, le cadre formel que nous proposons pour appréhender la complexité du comportement de navigation est plus homogène et plus respectueux de la nature du déplacement des piétons, comparé à l'existant. En occurrence, à la différence des modèles

microscopiques classiques, la planification d'itinéraire, le suivi d'itinéraire et la coordination s'articulent dans notre modèle pour résoudre un seul et même problème de décision clairement défini. Rappelons que les principales critiques contre les modèles microscopiques signalent l'ambiguïté entre ces deux aspects comme la principale cause des problèmes de crédibilité dans les espaces fortement congestionnés (Treuille *et al.*, 2006). Par ailleurs, bien que procédant d'une approche fondamentalement microscopique (les piétons sont représentés par des agents autonomes), nous ne négligeons pas le fait que les agents soient soumis à des lois d'écoulement. En cela, notre démarche est plus rigoureuse que les modèles microscopiques et macroscopiques classiques.

Dans le chapitre suivant, nous proposons une implémentation et une évaluation de notre modèle. Nous comparerons notre modèle à un modèle microscopique classique, en occurrence, le modèle RVO. Le but de cette comparaison est d'apprécier, via des simulations, les apports et les limitations de notre approche. L'évaluation se fera en deux volets :

1. Une première évaluation **non experte** qui consistera en un questionnaire pour comparer les deux modèles à travers des simulations de situations courantes.
2. Une deuxième évaluation, **experte**, qui nous permettra de comparer les deux modèles à travers des phénomènes d'écoulement connus (formation de file, effet de bord). Le but de cette évaluation est de comparer la crédibilité, visuellement, et d'un point de vue énergétique. Il sera également question d'apprécier l'évolution de la charge de calcul par cycle de simulation par rapport au nombre d'agents.

5 Évaluation

Dans ce chapitre, nous comparons les apports et les limitations de notre approche par rapport à une approche microscopique classique : notre choix s’est porté sur le modèle RVO (Van Den Berg et Manocha, 2008; Van Den Berg *et al.*, 2010), dont nous avons discuté la pertinence pour la définition d’un cadre formel permettant d’appréhender la complexité du comportement de navigation dans la section 3.3.3. Le modèle RVO est non seulement un des standards dans le domaine, connu pour ses performances en termes d’évitement de collisions et de passage à l’échelle, mais surtout, il utilise le paradigme des V-Obstacles pour le calcul des déplacements des agents : les agents choisissent dans un ensemble de vitesses admissibles, i.e. vitesses de déplacement qui permettent d’éviter les collisions avec les voisins, la vitesse la plus proche d’une vitesse désirée. Représenter l’action comme un vecteur vitesse nous semble être une manière robuste de modéliser le comportement de navigation des piétons — c’est pour cette raison que nous avons préféré ce type de modèle à d’autres (modèle de forces, modèle de steering, etc.). Comme nous l’avons vu dans la section 4.3.1, la génération d’influence dans notre modèle utilise le même principe de calcul, et il nous a semblé pertinent d’évaluer l’apport et les limitations de notre formulation pour la simulation en temps réel. Le but n’est pas seulement de faire ressortir l’originalité de notre approche par rapport à un modèle microscopique classique basé sur le paradigme des V-Obstacles, mais aussi de proposer une manière simple de faire évoluer ce type de modèles et ainsi de contribuer à améliorer l’existant. L’implémentation la plus récente du modèle RVO est accessible via la bibliothèque de programmation RVOLibrary²⁸.

Nous avons réalisé deux types d’évaluations. La première série d’évaluations — que nous qualifions de *non experte* — a consisté à faire analyser la crédibilité des simulations obtenues grâce aux modèles MIM et RVO par des observateurs non experts. Pour cela, nous avons mis en place un questionnaire en ligne montrant des simulations de situations courantes réalisées à partir des deux modèles. Des observateurs bénévoles ont ensuite été sollicités pour commenter et comparer la crédibilité des simulations suivant leurs

28. <http://gamma.cs.unc.edu/RVO2>

propres critères. Nous revenons en détails sur la méthodologie d'évaluation et présentons les résultats du questionnaire dans la section 5.3. La deuxième série d'évaluations — que nous qualifions d'*experte* — a consisté à comparer les deux modèles suivant leur capacité à reproduire des phénomènes d'écoulement connus parmi ceux que nous avons étudiés dans le chapitre 2. Nous avons sélectionné trois phénomènes d'écoulement — l'«*effet de bord*», l'«*effet sablier*» et la «*formation de files*» — et nous avons comparé les performances des deux modèles suivant trois critères :

1. **Visuel** : modèle qui reproduit le mieux le phénomène, visuellement.
2. **Énergétique** : modèle avec lequel la dépense énergétique est la plus économique.
3. **Computational** : modèle qui produit la simulation la moins coûteuse en termes de temps de calcul.

Sommaire

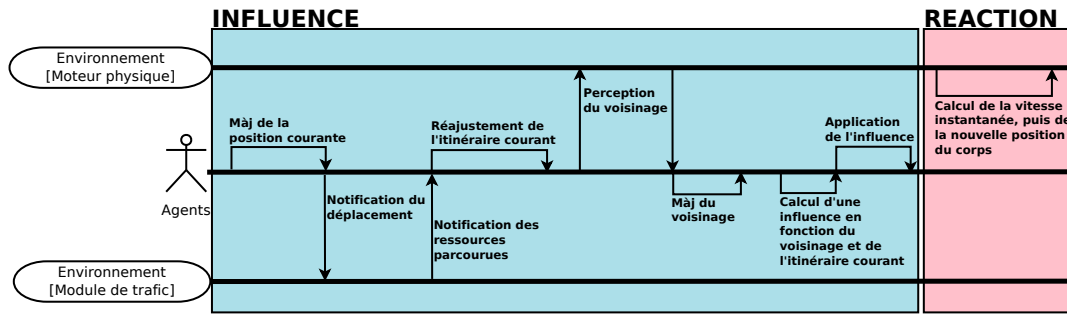
5.1	Mise en place du modèle MIM	83
5.2	Paramétrage de la simulation	85
5.3	Évaluation non experte	86
5.3.1	Questionnaire d'évaluation non experte	88
5.3.2	Analyse des résultats du questionnaire	90
5.3.3	Conclusion de l'évaluation non experte	95
5.4	Évaluation experte	96
5.4.1	Rendu visuel et dépense énergétique	97
5.4.2	Performances computationnelles	104
5.5	Synthèse de l'évaluation	108

5.1 Mise en place du modèle MIM

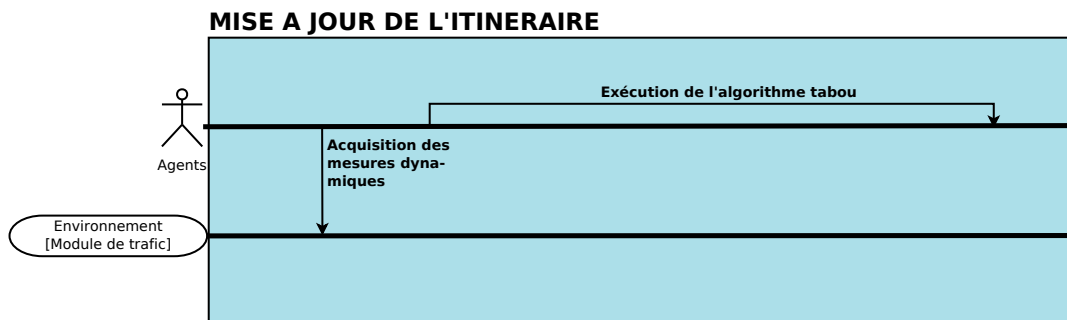
Conformément à nos spécifications, nous avons implémenté les comportements des agents en séparant ce qui relève de la représentation physique (le corps) de ce qui relève du module de délibération²⁹. Le calcul des vitesses admissibles en fonction du voisinage réutilise des algorithmes disponibles via RVOLib (voir section 5.2). La mise à jour des positions et le calcul des vitesses instantanées sont déplacés dans un composant indépendant qui modélise l'environnement (principe d'*influence / réaction*).

D'un point de vue logiciel, une simulation réalisée à partir de notre modèle exécute trois *tâches* en parallèle, comme l'indique la figure 5.1. La première tâche est représentée par le diagramme de séquence de la figure 5.1(c). Elle est dédiée à la génération d'influences et à la réaction de l'environnement. Il s'agit de la boucle de simulation principale qui est directement responsable du rendu graphique de la simulation. C'est en effet après chaque cycle de cette boucle que les positions et vitesses sont mises à jour et affichées sur le support de visualisation. La deuxième tâche est représentée par le diagramme de séquence de la figure 5.1(d) et concerne la recherche dynamique d'itinéraire. La troisième tâche est représentée par le diagramme de séquence de la figure 5.1(e) et concerne la mise à jour des historiques. Les trois tâches seront notées respectivement *Proc1*, *Proc2* et *Proc3*. Dans cette évaluation, les trois tâches sont toutes exécutées sur un même processeur.

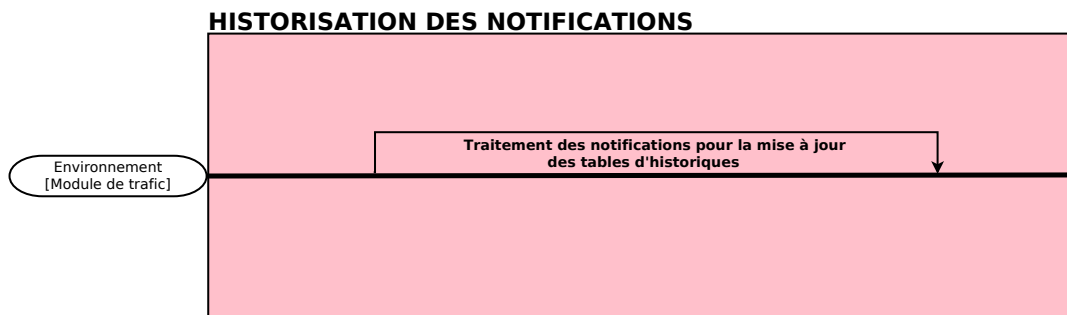
29. Pour plus de détails sur l'implémentation, voir annexe A.



(c) Proc1 : Influence et réaction



(d) Proc2 : Recherche dynamique d'itinéraire



(e) Proc3 : Historisation des notifications

FIGURE 5.1 – D'un point de vue logiciel, trois tâches fonctionnent en parallèle pour l'exécution d'une simulation à partir de notre modèle. La première tâche est dédiée à la phase d'influence et réaction (Proc1), la deuxième est dédiée à la mise à jour dynamique des itinéraires (Proc2), la troisième est dédiée à l'historisation des notifications (Proc3)

Les figures 5.2(a), 5.2(b) et 5.2(c) représentent les topologies qui nous servent d'espaces navigables pour nos différents scénarios. Celles-ci ont été générées grâce au logiciel FreeFem disponible en ligne³⁰. La figure 5.2(a) représente un espace navigable vide qui peut s'assimiler à une place ou une voie piétonne. La figure 5.2(c) représente un passage étroit qui peut correspondre à des entrées/sorties de bâtiments, des couloirs entre immeubles etc. La figure 5.2(b) représente un espace présentant un obstacle — cette con-

30. www.freefem.org

figuration est fréquente dans les milieux urbains, où les obstacles (poubelles, poteaux, etc.) sont clairsemés de manière à ne pas gêner le déplacement des piétons. Nous supposons que ces topologies fournissent une base suffisante pour générer des scénarios de comparaison pertinents. Leur sélection est inspirée de (Singh *et al.*, 2009).

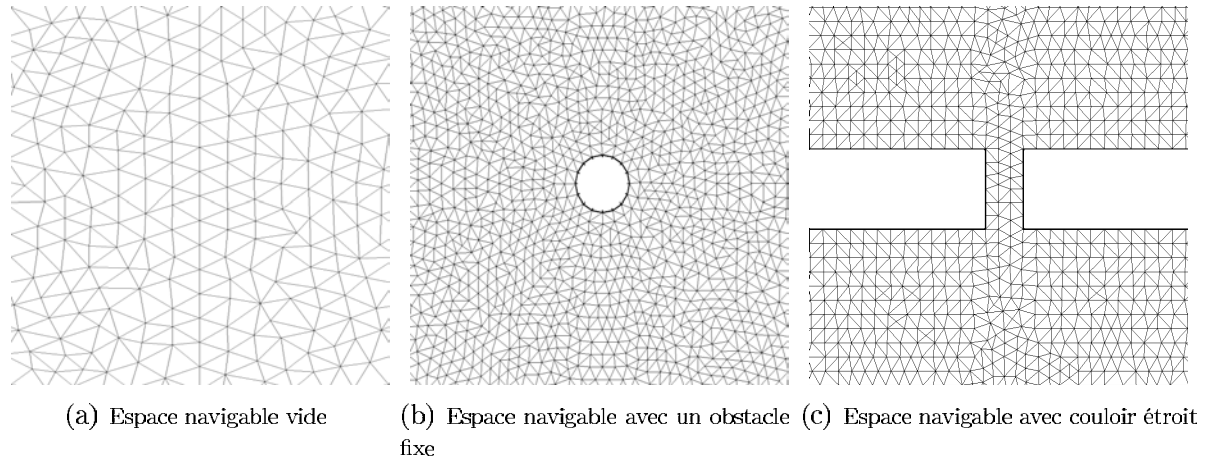


FIGURE 5.2 – Triangulations homogènes générées pour la simulation

5.2 Paramétrage de la simulation

Le modèle RVO et le modèle MIM sont initialisés avec les mêmes paramètres par défaut pour toutes les fonctionnalités qui leur sont communes. Il s’agit de : la détection du voisinage immédiat (en fonction d’un champ de perception et d’un temps d’anticipation), le calcul des vitesses admissibles, i.e. vitesses de déplacement qui garantissent un déplacement sans collision (calculées en fonction de la vitesse maximale de l’agent et de la taille des agents situés dans son voisinage immédiat).

Les valeurs des paramètres propres au modèle MIM sont initialisées d’après le tableau 5.1. La portée d’exclusion est fixée à 1 pour les arcs rajoutés, et à 2 pour les arcs supprimés. Nous avons finalement opté pour des portées d’exclusion différentes car cela donne plus de flexibilité à la recherche : en choisissant une portée d’exclusion plus importante pour les arcs supprimés, l’algorithme explore le voisinage de l’itinéraire courant plus rapidement. Le rayon du champ de perception pour l’algorithme de planification est le même que celui utilisé pour la détection du voisinage immédiat — cette disposition permet de garantir un même champ de perception pour les deux modèles. Le nombre maximal d’agents par ressource q_{max} est calculé à partir des triangulations produites par le logiciel FreeFem

Tableau 5.1 – Paramétrisation propre au modèle MIM. m désigne la taille par défaut des tables d'historique. dt_H désigne la fréquence de l'historisation (*Proc3*). ts_Freq désigne la fréquence d'exécution de l'algorithme tabou. Dans cette évaluation nous supposons que tous les agents exécutent l'algorithme tabou au même moment.

ts_radius	10	Rayon du champ de recherche (au delà de ce champ l'agent ne perçoit pas la dynamique du trafic au sein des ressources)
ts_iter	2	Nombre d'itérations à effectuer par cycle de recherche
e_{marche}	1.26	unité $\frac{J \cdot s}{kg \cdot m^2}$
e_{debout}	2.23	unité $\frac{J}{kg \cdot s}$
$e_{collision}$	10	unité $\frac{J}{kg \cdot m \cdot s}$
ts_freq	0.1 s	Fréquence de planification (nombre de planification par temps de cycle)
dt_H	0.01 s	Fréquence de l'historisation
m	50	Taille des tables d'historique
ts_add	1	Nombre d'itérations pendant lesquelles un arc rajouté reste tabou
ts_remove	2	Nombre d'itérations pendant lesquelles un arc remplacé reste tabou
q_{max}	3	Nombre maximal d'agents par ressource

et de la taille par défaut des agents (qui est la même pour les deux modèles). Dans nos expérimentations q_{max} vaut 3.

5.3 Évaluation non experte

L'évaluation non experte a consisté à faire évaluer les fonctionnalités des modèles MIM et RVO par des bénévoles — l'objectif étant de comparer les apports et les limitations de notre approche par rapport au modèle RVO, **du point de vue d'un observateur non expert**.

Pour mettre en œuvre cette première évaluation, nous avons sélectionné une dizaine de scénarios qui représentent des situations courantes et qui permettent d'apprécier les fonctionnalités d'un modèle de déplacement quelconque dans des espaces très peu ou moyennement congestionnés (voir (Singh *et al.*, 2009), pour une revue complète sur ces situations). Chacune des situations retenues a ensuite été simulée séparément par les modèles MIM et RVO, et les simulations ont été enregistrées sous forme de vidéos.

Les paramètres suivants nous permettent de définir formellement un scénario :

- un nombre N d'agents, avec une distribution donnée de vitesses maximales.
- une position de départ et une destination pour chacun des agents.
- un espace navigable présentant une topologie particulière.

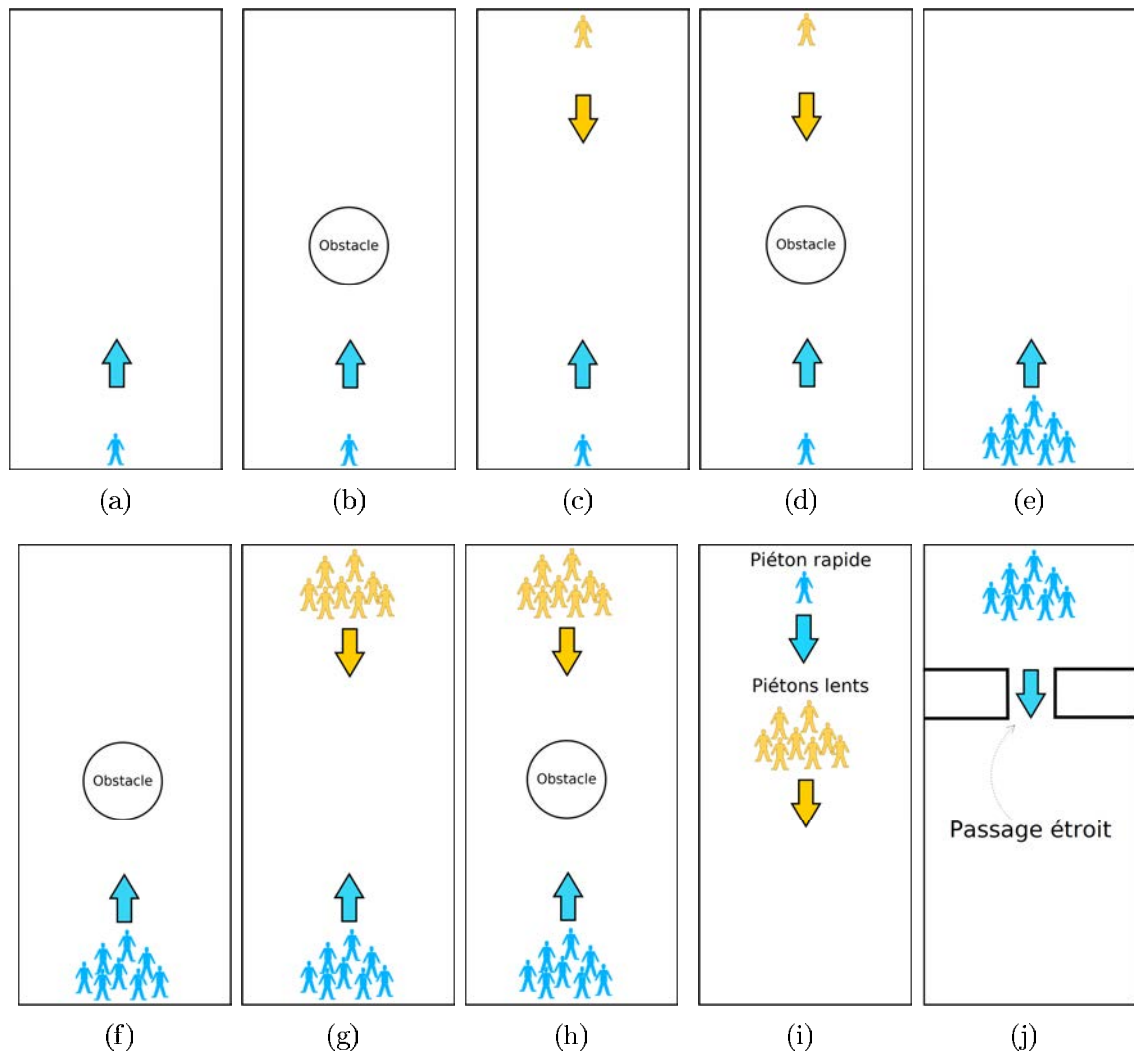




FIGURE 5.3 – Scénarios de simulation pour l'évaluation non experte

Ci-après (voir figure 5.3), nous décrivons les situations que nous avons sélectionnées pour évaluer les deux modèles :

1. Un piéton seul qui se déplace en direction d'un point (figure 5.3(a)).
2. Un piéton seul qui se déplace en direction d'un point et qui doit éviter un obstacle (figure 5.3(c)).
3. Deux piétons qui se croisent (figure 5.3(b)).
4. Deux piétons qui se croisent en évitant un obstacle (figure 5.3(d)).
5. Plusieurs piétons qui se déplacent dans la même direction (figure 5.3(e)).
6. Plusieurs piétons qui se déplacent dans la même direction et qui doivent éviter un obstacle (figure 5.3(f)).

7. Deux groupes de piétons qui se croisent (figure 5.3(g)).
8. Deux groupes de piétons qui se croisent en évitant un obstacle (figure 5.3(h)).
9. Un piéton qui avance derrière un groupe de piétons moins rapide (figure 5.3(i)).
10. Plusieurs piétons qui empruntent un passage étroit (figure 5.3(j)).

Sur les figures 5.3(a-j), \Leftrightarrow représente la direction du déplacement et  symbolise un piéton – nous utilisons les couleurs bleue et orange pour distinguer les deux directions dans les scénarios 3, 4, 7, 8, et pour différencier les piétons lents du piéton rapide dans le scénario 9. Le symbole  représente un obstacle. Les quatre premières situations concentrent l'évaluation sur la cinématique des trajectoires et les évitements de collision. Les six dernières situations permettent de vérifier l'émergence de comportements individuels et de groupes.

5.3.1 Questionnaire d'évaluation non experte

Nous avons mis en place un questionnaire en ligne ³¹ composé de dix *pages* représentant chacune l'une des dix situations sélectionnées (voir figure 5.4). Chaque page du questionnaire propose les deux vidéos de simulation réalisées à partir des modèles RVO et MIM à la libre appréciation d'un observateur. Celui-ci, après visionnage des vidéos, est invité à attribuer une note comparative allant de 0 à 5 avec les significations suivantes :

- 0 : *«aucune des deux simulations n'est crédible»*
- 1 : *«la simulation de gauche est beaucoup plus crédible que celle de droite»*
- 2 : *«la simulation de gauche est plus crédible que celle de droite»*
- 3 : *«les deux simulations sont pareillement crédibles»*
- 4 : *«la simulation de droite est plus crédible que celle de gauche»*
- 5 : *«la simulation de droite est beaucoup plus crédible que celle de gauche»*

Aucune indication ne permet à l'observateur de connaître les modèles utilisés pour produire chacune des simulations, et l'ordre des vidéos varie d'une page à l'autre. Ces dispositions sont prises pour garantir que les comparaisons se font uniquement sur la base des résultats présentés dans les vidéos de simulation. Nous avons sollicité plusieurs bénévoles par mail pour répondre au questionnaire ³² et obtenu 140 réponses exploitables.

31. www-desir.lip6.fr/~simokanmeugne/evaluation0.html

32. Les bénévoles ont été contactés via : le réseau du laboratoire d'informatique de Paris VI, le relais d'information sur les sciences cognitives (RISC), le réseau des étudiants en Master II Extraction de Connaissances à partir des Données de l'université de Lyon II ³(ECD), plusieurs réseaux d'amis.

(1) **1** 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Accueil **Questionnaire**

Pour mieux visualiser les videos, passer en mode "plein écran"...

LIPTHALES

(2)

Piéton se dirigeant vers un point (3)

Les piétons sont représentés par des cercles. Les carrés bleu et rouge représentent les points de départ ou d'arrivée. (4)

*Obligatoire

Comparer la crédibilité des animations de gauche et de droite *

0 : "Aucune n'est crédible" ; 1 : "Celle de gauche est beaucoup plus crédible" ; 2 : "Celle de gauche est plus crédible" ; 3 : "Les deux sont pareillement crédibles" ; 4 : "Celle de droite est plus crédible" ; 5 : "Celle de droite est beaucoup plus crédible" ;

0 1 2 3 4 5 (6)

(5)

Si possible, motivez votre réponse en quelques mots

(7)

Envoyer (8)

N'envoyez jamais de mots de passe via l'outil Formulaires Google.

Ce contenu n'est ni rédigé, ni cautionné par Google.

Fourni par **Google Drive**

[Signaler un cas d'utilisation abusive](#) - [Conditions d'utilisation](#) - [Clauses additionnelles](#)

FIGURE 5.4 – (1) Identifiant du scénario, (2) emplacement réservé aux vidéos, (3) titre du scénario, (4) Brève description du scénario, (5) présentation des notes possibles, (6) sélection d'une note, (7) Motivation de la note (facultative), (8) validation de la note

La majorité des bénévoles (73%) sont des étudiants ou des universitaires. Parmi les observateurs qui ne sont ni étudiants ni universitaires, nous comptons : des professionnels de l'informatique et de la communication (29%), des agents de l'administration publique (16%), des professionnels de la restauration et de l'hébergement (3%), etc. Les observateurs peu ou pas du tout familiers des simulations comportementales représentent 76% de l'effectif dans la catégorie des étudiants et des universitaires, et 71% dans l'autre catégorie, soit plus de la majorité toutes catégories confondues. Ces statistiques nous permettent de qualifier ces observateurs de *non experts* et ainsi de valider notre évaluation.

Afin d'analyser les résultats du questionnaire, nous avons tout d'abord recensé toutes les notes obtenues par scénario. Chaque note obtenue a été enregistrée en tant que comparaison entre les deux modèles. Une occurrence de la note 0 signifie, par exemple, que *pour le scénario en cours de traitement, un des observateurs juge qu'aucun des modèles n'est crédible*. Lorsqu'une note classe une vidéo au dessus d'une autre, nous regardons à quel modèle elle correspond — nous rappelons que cette information n'est pas disponible pour les observateurs — et nous enregistrons la comparaison adaptée. Ainsi, la note 5, sur une feuille où le modèle RVO correspond à la vidéo de gauche, signifie que *pour le scénario en cours de traitement, un observateur juge que notre modèle est beaucoup plus crédible que le modèle RVO*.

5.3.2 Analyse des résultats du questionnaire

Dans cette section, nous présentons l'analyse des résultats pour chaque scénario. Les résultats seront présentés sous forme de diagrammes en barre. En abscisse du diagramme :

- *RVO* représente le nombre d'observateurs ayant classé le modèle RVO au dessus du modèle MIM. Dans cet effectif, nous distinguerons ceux qui ont jugé le modèle RVO **plus crédible (+)**, de ceux qui l'ont jugé **beaucoup plus crédible (++)**.
- *MIM* représente le nombre d'observateurs ayant classé le modèle MIM au dessus du modèle RVO. Dans cet effectif, nous distinguerons ceux qui ont jugé le modèle RVO **plus crédible (+)**, de ceux qui l'ont jugé **beaucoup plus crédible (++)**
- *MIM, RVO* représentent les observateurs qui n'ont classé aucun modèle au dessus de l'autre. Dans cet effectif, nous distinguerons ceux qui ont jugé qu'**aucun des deux modèles n'est crédible (0)**, de ceux qui ont jugé que **les deux modèles sont pareillement crédibles (=)**

Nous avons également proposé aux observateurs de motiver leur note. Nous reviendrons sur quelques unes de ces motivations lorsque nous analyserons les différents résultats.

Un piéton seul qui se déplace en direction d'un point (avec et sans obstacle)

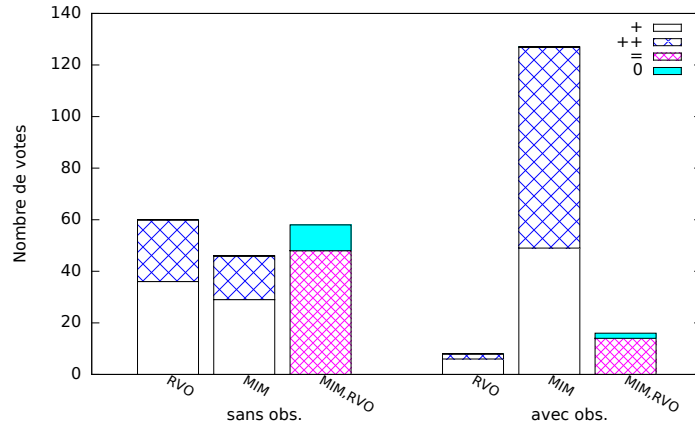


FIGURE 5.5 – Analyse des réponses : Un piéton seul qui se déplace en direction d'un point (avec et sans obstacle)

La figure 5.5 montre les résultats des notes pour ce scénario avec (à droite de la figure) et sans (à gauche de la figure) obstacle. L'agent du modèle RVO se déplace de manière rectiligne du point de départ au point d'arrivée, tandis que l'agent du modèle MIM se déplace de ressource en ressource jusqu'à la ressource contenant le point d'arrivée. Pour les deux situations (avec et sans obstacle), les observateurs signalent des trajectoires moins lisses (du fait de la triangulation de l'espace navigable) sur les simulations réalisées avec le modèle MIM que sur celles réalisées avec le modèle RVO. Lorsque la destination est située derrière un obstacle, les observateurs notent une meilleure anticipation pour le modèle MIM et le jugent plus crédible.

Deux piétons qui se croisent (avec et sans obstacle)

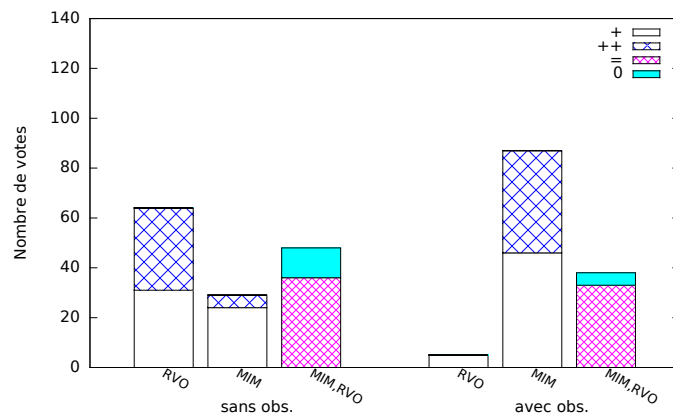


FIGURE 5.6 – Analyse des réponses : Deux piétons qui se croisent (avec et sans obstacle)

Les observations précédentes (i.e. Un piéton seul qui se déplace en direction d'un point) s'appliquent également à ces scénarios (voir figure 5.6). Notons que l'appréciation de la cinématique des trajectoires dans ces scénarios est très subjective, car plusieurs observateurs jugent que les trajectoires moins lisses sont précisément plus «humaines» que des trajectoires parfaitement rectilignes.

Plusieurs piétons qui se déplacent dans la même direction (avec et sans obstacle)

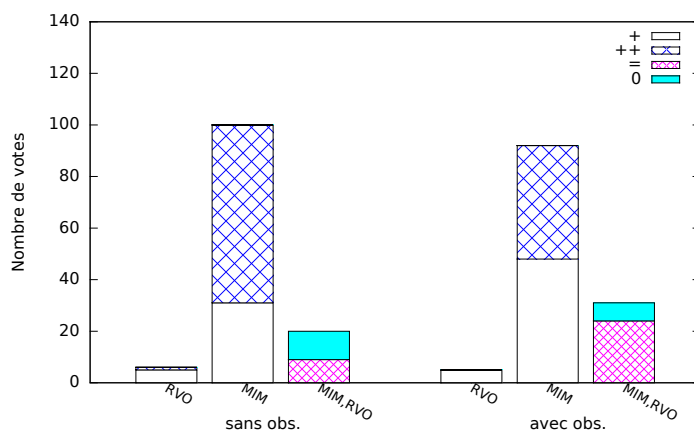


FIGURE 5.7 – Analyse des réponses : Plusieurs piétons qui se déplacent dans la même direction (avec et sans obstacle)

La figure 5.7 montre les résultats des notes pour ce scénario avec (à droite de la figure) et sans (à gauche de la figure) obstacle. Le modèle MIM reproduit des formations en V, observables dans la réalité dans les mêmes conditions (Moussaid *et al.*, 2010), tandis que le modèle RVO produit un déplacement rectiligne sans déviation. La grande majorité des observateurs jugent le modèle MIM plus crédible. De manière générale, les observateurs notent une meilleure répartition des agents dans l'espace sur les simulations réalisées à partir de notre modèle.

Deux groupes de piétons qui se croisent (avec et sans obstacle)

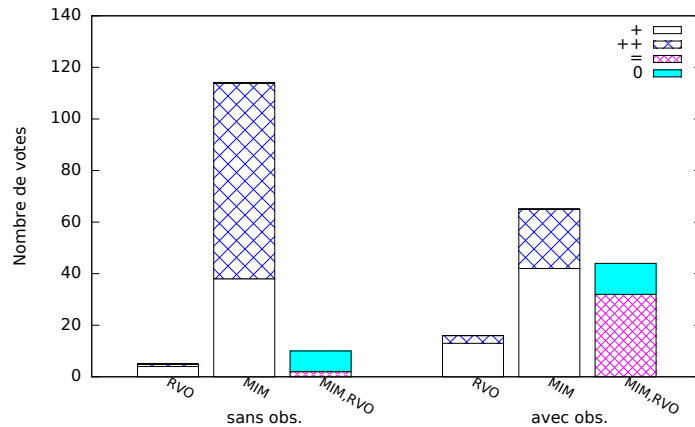


FIGURE 5.8 – Analyse des réponses : Deux groupes de piétons qui se croisent (avec et sans obstacle)

Pour ces scénarios, les observateurs jugent le modèle MIM plus crédible que le modèle RVO (voir figure 5.8). Les agents MIM s'organisent plus nettement en files à l'approche du croisement, conformément aux observations empiriques effectuées en situations réelles (voir la description du phénomène de formation de files dans la section 2.2), tandis que les agents RVO ne s'évitent que lorsque la collision est imminente. La figure 5.9 montre un aperçu des rendus obtenus à partir des modèles RVO et MIM pour un croisement sans obstacle.

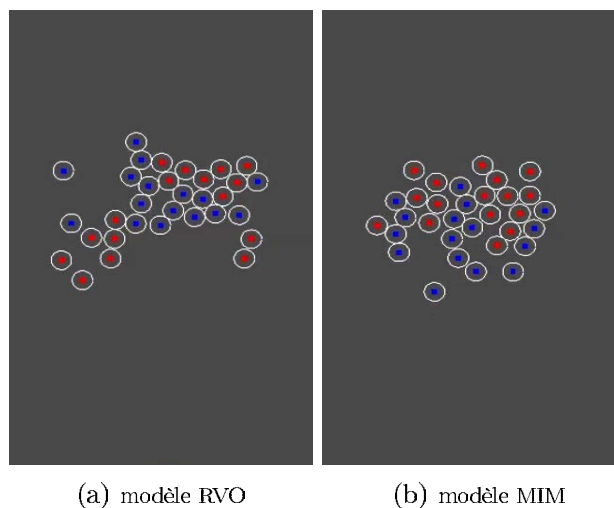


FIGURE 5.9 – Deux groupes de piétons qui se croisent (sans obstacle) : comparaison des rendus obtenus à partir des modèles MIM et RVO au moment du croisement. La figure (a) correspond à la simulation effectuée à partir du modèle RVO et la figure (b) correspond à la simulation effectuée à partir du modèle MIM

Un piéton qui avance derrière un groupe de piétons moins rapides

Pour ce scénario, l'agent MIM contourne le groupe de piétons moins rapides, tandis que l'agent RVO passe au milieu du groupe. Ici, la planification dynamique permet à l'agent MIM d'emprunter les ressources sur lesquelles le trafic est le plus fluide relativement à ses capacités individuelles (voir à gauche de la figure 5.12). La figure 5.9 montre un aperçu des rendus obtenus à partir des modèles RVO et MIM peu après la rencontre entre le piéton rapide et les piétons lents.

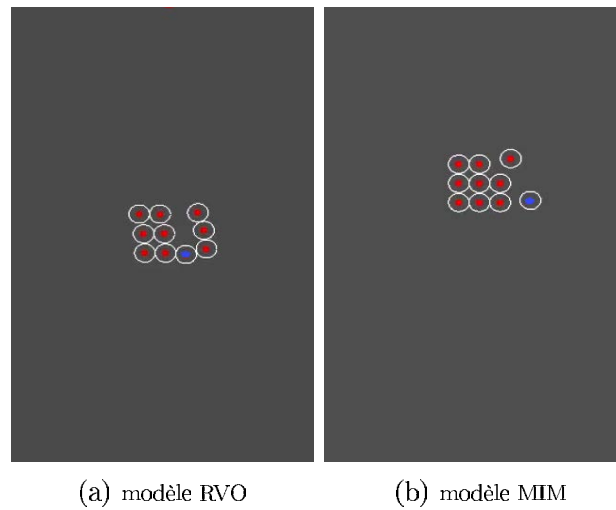


FIGURE 5.10 — Un piéton qui avance derrière un groupe de piétons moins rapides : comparaison des rendus obtenus à partir des modèles MIM et RVO peu après la rencontre entre le piéton rapide et les piétons lents

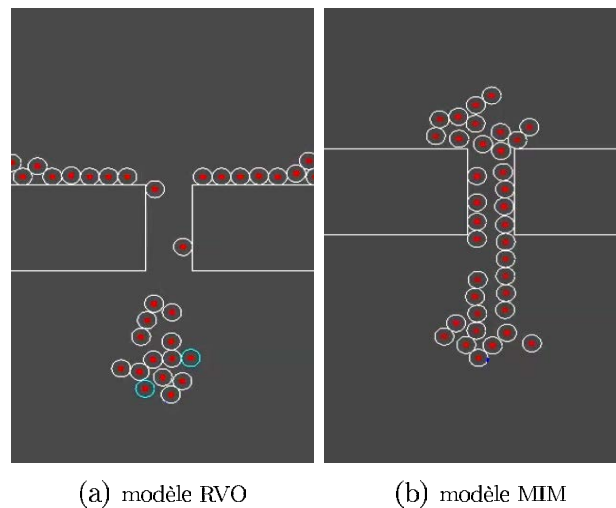


FIGURE 5.11 — Plusieurs piétons qui empruntent un passage étroit : comparaison des rendus obtenus à partir des modèles MIM et RVO à l'entrée du passage étroit.

Plusieurs piétons qui empruntent un passage étroit

Les performances du modèle MIM pour ce scénario se rapprochent plus de la réalité d'après les observateurs (voir à droite de la figure 5.12). Le modèle MIM reproduit un *goulot d'étranglement* à l'entrée du passage, contrairement au modèle RVO, où les agents s'étalent sur les bords (voir figure 5.11).

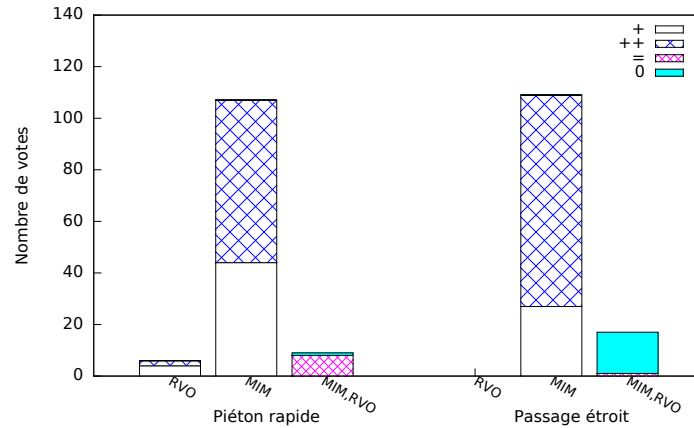


FIGURE 5.12 – Analyse des réponses : dépassement et passage étroit

5.3.3 Conclusion de l'évaluation non experte

Pour la quasi totalité des scénarios, le modèle MIM est jugé plus crédible que le modèle RVO, et ce, malgré des trajectoires moins lisses (dus à la triangulation de l'espace). **Les interactions entre agents via le module de trafic et la planification dynamique d'itinéraire** permettent de reproduire des comportements individuels (exemple : dépassement) et collectifs (exemples : formation en V, formation de files, goulot d'étranglement) plus riches. Les simulations réalisées dans cette première partie nous permettent de soutenir que notre modèle possède les avantages d'un modèle microscopique classique (évitement de collisions, autonomie) et propose des comportements plus réalistes dans des espaces peu ou moyennement congestionnés.

Dans la deuxième phase de notre évaluation, nous nous proposons de généraliser les résultats obtenus à des espaces plus congestionnés. Nous nous intéressons expressément à trois phénomènes : les **effets de bords**, la **formation de files** et l'**effet sablier**. Nous simulons les situations favorables à l'émergence de ces phénomènes et discutons des performances de notre modèle comparativement au modèle RVO. Les situations que nous mettons en scène sont celles qui ont été présentées dans la section 2.2 lorsque nous discutons des propriétés dynamiques du déplacement de piétons. Il s'agit des situations

suivantes :

- situation favorable à l'émergence de l'effet de bord : «**plusieurs piétons qui se déplacent dans la même direction**».
- situation favorable à l'émergence de l'effet sablier : «**plusieurs piétons qui empruntent un passage étroit**».
- situation favorable à l'émergence du phénomène de formation de file : «**deux groupes de piétons qui se croisent**».

5.4 Évaluation experte

Le but de cette deuxième phase de l'évaluation est de comparer les deux modèles suivant leurs capacités à reproduire des phénomènes d'écoulement connus. Comme nous l'évoquions au début de ce chapitre, nous effectuons nos comparaisons relativement à trois aspects : *visuel* (modèle qui décrit visuellement mieux le phénomène), *énergétique* (modèle qui fournit la dépense énergétique la plus économique sur l'ensemble de la simulation) et *computationnel* (modèle le plus économique en temps de calcul par cycle).

Pour comparer la dépense énergétique moyenne entre le modèle MIM et le modèle RVO en s'affranchissant des spécificités topologiques du scénario (exemple : distance entre la position de départ et la destination, topologie de l'espace, etc.), nous nous inspirons des travaux de Kapadia *et al.* (2011) et de Guy *et al.* (2010a). Nous supposons que pour un trajet donné (i.e. pour un point de départ et un point d'arrivée donnés), *la dépense énergétique optimale s'obtient en se déplaçant le long du chemin le plus court, sans collision et avec une vitesse constante et égale à $\sqrt{\frac{e_{debout}}{e_{marche}}} = \sqrt{\frac{2.23}{1.26}} = 1.33m \cdot s^{-1}$* — une justification mathématique de cette propriété est proposée dans (Guy *et al.*, 2010a).

À partir de ce résultat, il est possible de déduire la dépense totale optimale d'un agent a de masse $mass_a$ pour un trajet de longueur L :

$$E_a^{opt} = 2 \cdot mass_a \cdot L \cdot \sqrt{e_{debout} \cdot e_{marche}}$$

Nous utilisons cette formule pour normaliser la dépense énergétique moyenne pour chacune des simulations que nous effectuons pour cette évaluation, et nous déduisons un *score* neutre (i.e sans unités) suivant lequel nous comparons la crédibilité de chaque modèle (Kapadia *et al.*, 2011).

$$score(X, s) = \frac{\sum_a E_a^{opt}}{\sum_a E_a(X, s)} \quad , \quad score(X, s) \in [0, 1]$$

Ici $score(X, s)$ désigne le score obtenu en utilisant le modèle X sur le scénario s . $E_a(X, s)$ désigne l'énergie totale dépensée par un agent a , suivant le modèle X , sur l'ensemble de la simulation, de la position de départ jusqu'à sa destination. Notons que suivant cette formule, le *modèle parfait* devrait obtenir un score de 1 sur n'importe quel scénario, et qu'un modèle X est plus performant qu'un modèle Y , relativement à un scénario s , si $score(X, s) > score(Y, s)$.

Les simulations ont été réalisées sur un ordinateur Windows 7 32 bits, d'une mémoire vive de 2 Go, muni d'un processeur Intel Core 2 Duo 2.33 GHz. Les paramètres de l'algorithme tabou et des algorithmes de calcul des vitesses admissibles en fonction du voisinage sont les mêmes que pour la mise en place du questionnaire (voir section 5.3).

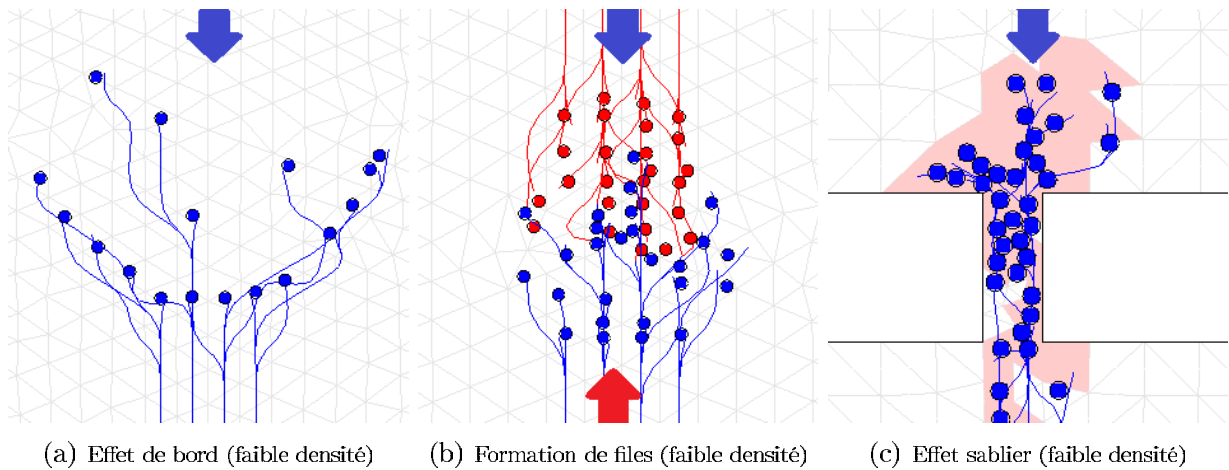


FIGURE 5.13 — Simulation de situations (faible densité) favorables à l'émergence de phénomènes d'écoulement connus à partir du modèle MIM : Effet de bord (a) Formation de files (b) Effet sablier (c). Les agents sont représentés par des disques et coloriés suivant le sens de leur déplacement. Les flèches bleues et rouges désignent respectivement le sens de déplacement des agents bleus et rouges.

5.4.1 Rendu visuel et dépense énergétique

Dans cette section, nous évaluons le rendu visuel et la dépense énergétique générés par les deux modèles (MIM et RVO). Pour mettre en œuvre cette évaluation, nous avons simulé les déplacements de groupes allant de 100 à 1000 agents, en mettant en scène les trois situations sélectionnées. La figure 5.13 montre les rendus des simulations de ces trois situations obtenus à partir du modèle MIM pour un petit nombre d'agents. Les agents sont représentés par des disques et coloriés en fonction du sens de leur déplacement. Les flèches bleues et rouges désignent respectivement le sens de déplacement des agents bleus et rouges. Sur la figure 5.13(c), les ressources (mailles triangulaires) sont coloriées suivant la fréquentation moyenne (calculée à partir de l'historique de fréquentation — cf. section

4.3.2)

Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons les résultats de l'évaluation du rendu visuel et de la dépense énergétique pour chacun des phénomènes. Les simulations que nous commentons sont disponibles en ligne³³.

33. www-desir.lip6.fr/~simokanmeugne/accueil.html

Effet de bord

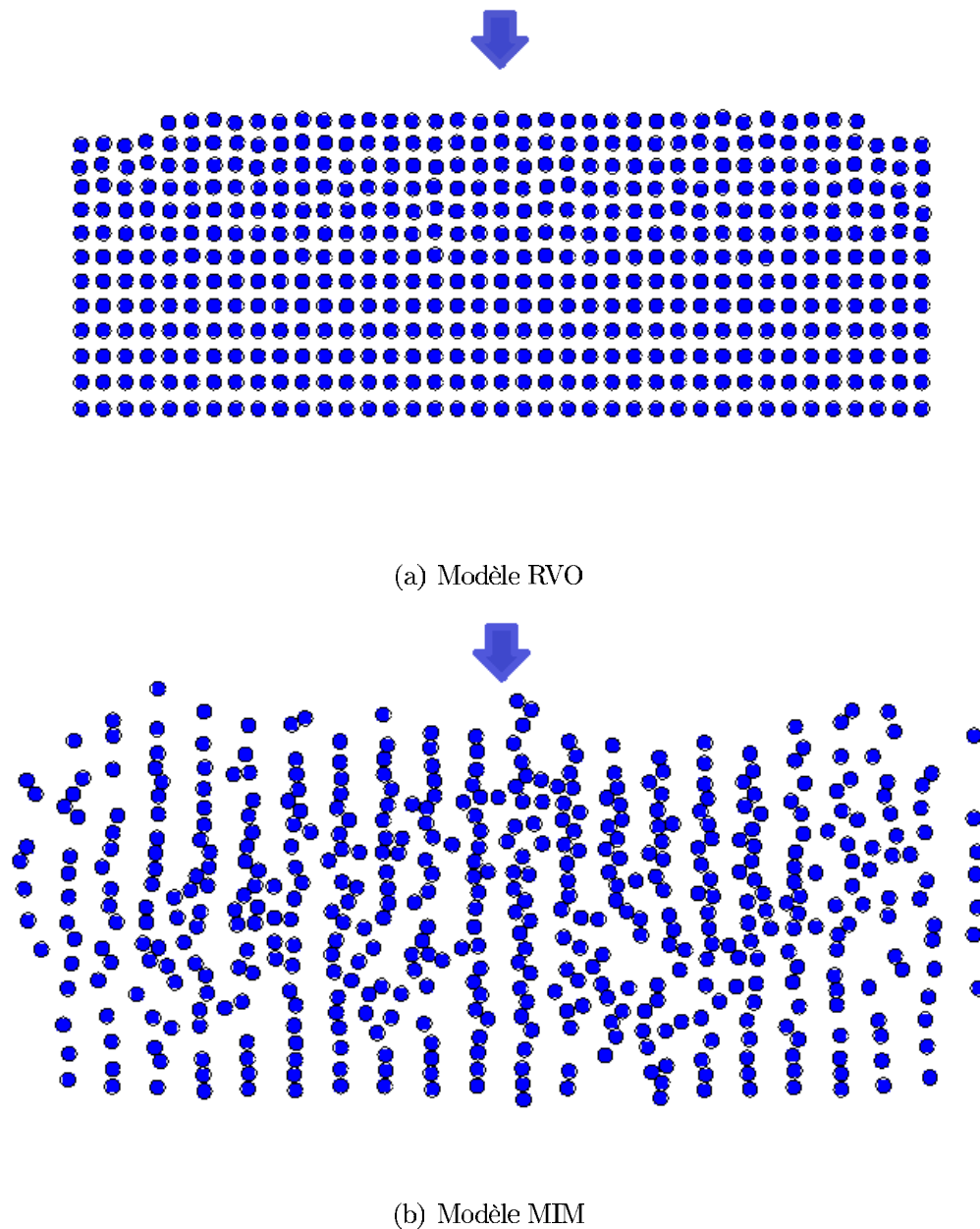


FIGURE 5.14 – Effet de bord

La figure 5.14 montre deux simulations d'une situation favorable à l'émergence des effets de bord (Still, 2000) : «**plusieurs piétons qui se déplacent dans la même direction**». La figure 5.14(a) montre le résultat obtenu à partir du modèle RVO, et la figure 5.14(b) montre le résultat obtenu à partir du modèle MIM. Ces deux simulations mettent en scène un groupe de 500 agents. Plus loin (dans la section 5.4.2) nous discutons de l'impact du nombre d'agents sur l'interactivité de la visualisation.

Visuellement, la simulation produite par notre modèle (figure 5.14(b)) correspond mieux aux descriptions admises dans le domaine. Nous observons, en effet, **des déplacements plus amples à la périphérie et resserrés au centre** (cf. section 2.2). Ceci confirme les fonctionnalités propres à notre modèle — notamment, la répartition réaliste des agents dans l'espace — que nous avons entrevues dans les vidéos du questionnaire d'évaluation.

La figure 5.15 montre l'évolution des scores réalisés par les deux modèles pour un nombre d'agents allant de 100 à 1000. Le modèle MIM s'avère plus performant que le modèle RVO en termes de dépense énergétique, car il obtient un meilleur score sur l'ensemble des simulations (relativement à la formule 5.1). Nous reviendrons plus loin (section 5.4.2) sur les performances des deux modèles en terme de temps de calcul.

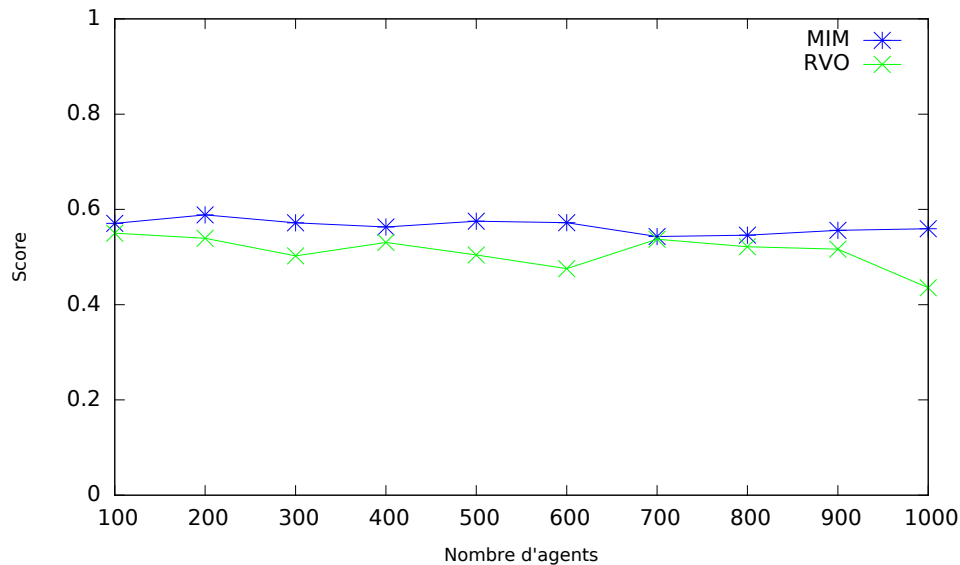


FIGURE 5.15 — Effet de bord : comparaison de la dépense énergétique moyenne en fonction du nombre d'agents pour les modèles RVO et MIM

Formation de files

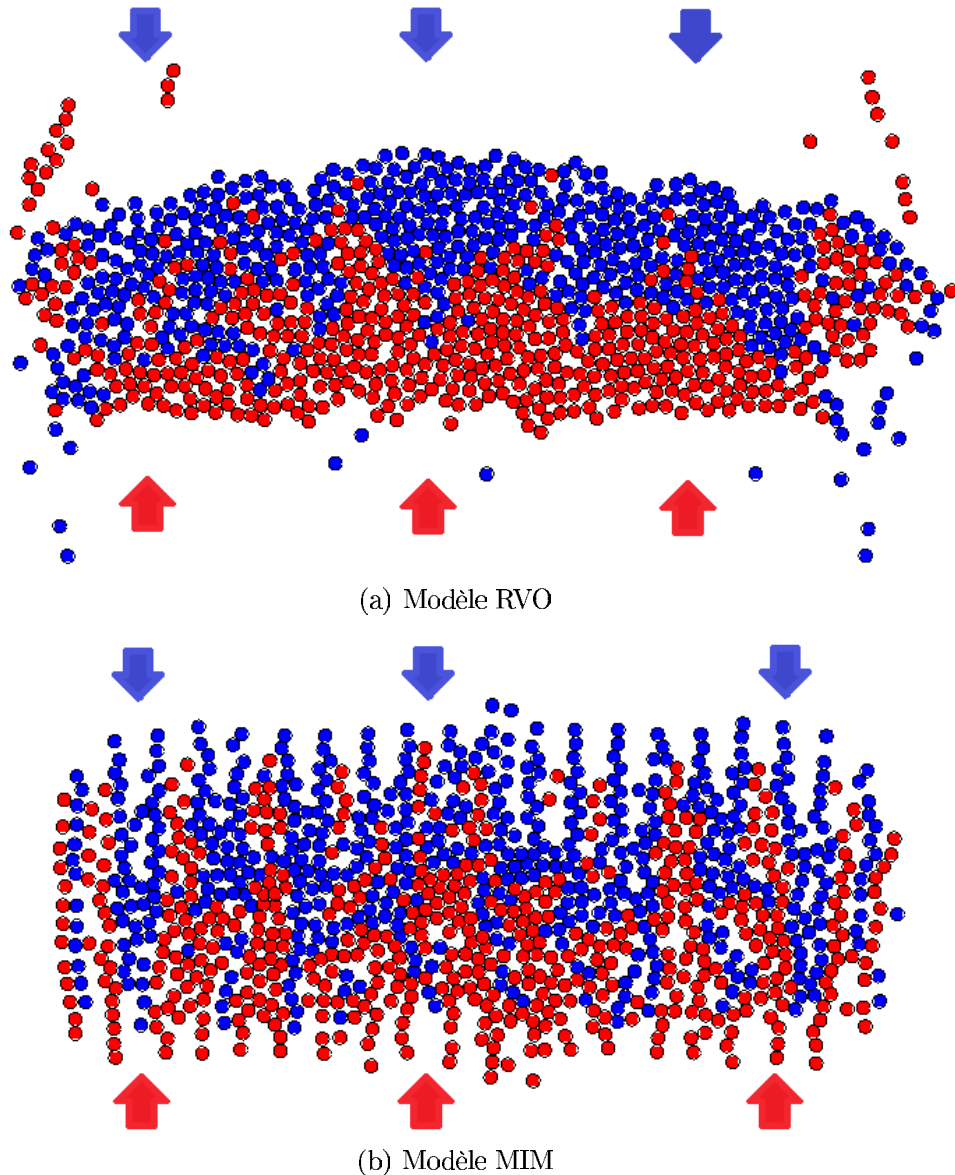


FIGURE 5.16 – Formation de files

La figure 5.16 montre deux simulations d’une situation favorable à l’émergence du phénomène de formation de files : «**deux groupes de piétons qui se croisent**». Les figures 5.16(a) et 5.16(b) représentent les résultats obtenus respectivement à partir des modèles RVO et MIM pour un total de 1000 agents, dont 500 dans chaque groupe.

Les simulations produites à partir du modèle MIM correspondent mieux à la description du phénomène telle que fournie dans la littérature : à l’approche de l’*intersection*, les agents du modèle MIM s’organisent en files bidirectionnelles afin de limiter les conflits

entre eux tout en avançant vers leur destination le plus efficacement possible — cf. (Zhang *et al.*, 2012), voir section 2.2). Le modèle RVO effectue des évitements de collisions, mais ne reproduit pas le phénomène. Ceci nous permet de soutenir, en ligne avec les réponses obtenues dans l’analyse du questionnaire d’évaluation, que les évitements de collisions ne sont qu’un aspect du comportement de navigation et n’expliquent pas à eux seuls toute la complexité des comportements observés dans la réalité. Le cadre formel que nous définissons pour notre modèle nous permet de prendre en compte les interactions entre agents de manière plus pertinente.

La figure 5.17 montre l’évolution des scores réalisés par les deux modèles pour un nombre d’agents allant de 100 à 1000. Notre modèle s’avère plus performant que le modèle RVO en termes de dépense énergétique. La différence de performance en termes de dépense énergétique augmente avec le nombre d’agents, ce qui montre, en plus, que notre modèle s’adapte mieux à la congestion. La diminution progressive des scores des deux modèles lorsque le nombre d’agents augmente est due à l’augmentation progressive du nombre de conflits. Plus il y a de conflits, plus les agents perdent du temps en ralentissant (dans les modèles MIM et RVO) ou font des détours (dans le modèle MIM uniquement). Cela génère des dépenses supplémentaires et pénalise les scores des modèles.

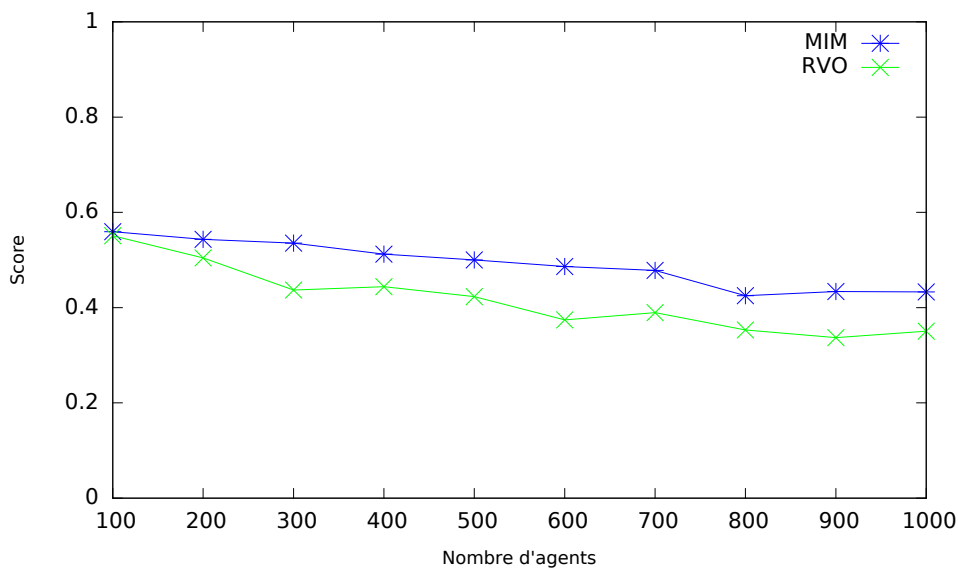


FIGURE 5.17 — Formation de files : comparaison de la dépense énergétique moyenne en fonction du nombre d’agents pour les modèles RVO et MIM. Les scores des deux modèles diminuent lorsque le nombre d’agents augmente.

Effet sablier

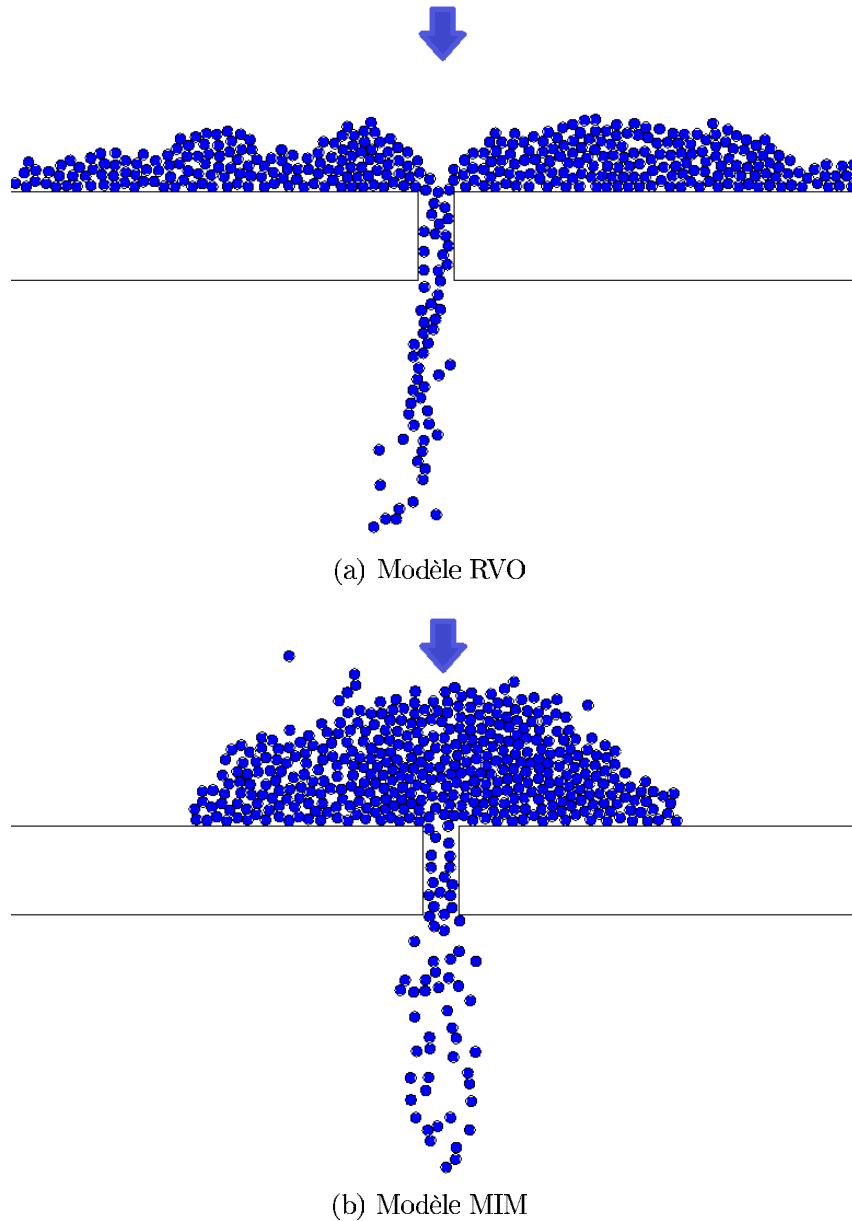


FIGURE 5.18 – Effet sablier

La figure 5.18 montre deux simulations d'une situation favorable à l'émergence de l'effet sablier : « **plusieurs piétons qui empruntent un passage étroit** ». La figure 5.18(a) montre le résultat obtenu à partir du modèle RVO et la figure 5.18(b) montre le résultat obtenu à partir du modèle MIM. Ces deux simulations mettent en scène 1000 agents chacune. Nous rappelons que l'effet sablier s'observe lorsque le nombre de piétons arrivant dans un espace est supérieur à la capacité d'accueil de cet espace (voir section

2.2).

Le modèle MIM reproduit un goulot d'étranglement à l'entrée du passage (figure 5.18(b)), conformément aux observations effectuées en situations réelles (voir section 2.2). Dans la simulation réalisée à partir du modèle RVO, les agents se dispersent sur les bords du passage et y restent coincés. Notons que pour cette raison, nous ne pouvons pas effectuer une comparaison empirique des scores. Cette comparaison n'est d'ailleurs pas nécessaire pour justifier que notre modèle est plus performant que le modèle RVO en termes de dépense énergétique.

Conclusion de l'évaluation du rendu visuel et de la dépense énergétique

L'évaluation du rendu visuel et de la dépense énergétique nous permettent de généraliser les résultats observés pendant la phase d'évaluation non experte. Notre modèle s'avère, dans l'ensemble, plus crédible que le modèle RVO quelque soit le niveau de congestion. Le modèle MIM est capable de reproduire des phénomènes d'écoulement connus lorsque les situations favorables à l'émergence de ces phénomènes sont mises en scène. Ce résultat nous permet de défendre le potentiel de notre modèle, non seulement pour la mise en place de simulations immersives, mais aussi pour le développement d'outils d'aide à la décision crédible, i.e capable de mettre en scène des situations courantes, d'anticiper des phénomènes, de valider des hypothèses, etc.

5.4.2 Performances computationnelles

Dans cette section, nous apprécions la robustesse au passage à l'échelle du modèle MIM par rapport au modèle RVO. Nous rappelons que par rapport au modèle RVO, les simulations réalisées à partir du modèle MIM comprennent deux tâches supplémentaires qui s'exécutent en parallèle³⁴ : pour la mise à jour des itinéraires (*Proc1*) et pour le traitement des notifications (*Proc3*) — cf. figure 5.1. Nous souhaitons évaluer le coût supplémentaire que ces tâches entraînent par rapport au modèle *RVO* pour des scénarios identiques, en termes de temps d'exécution par cycle. Au delà de la simple comparaison des temps de d'exécution par cycle, l'objectif de cette évaluation est surtout de vérifier si les performances computationnelles du modèle MIM sont *suffisantes* pour produire une visualisation interactive des résultats. L'interactivité de visualisation se mesure ici en **nombre d'images par secondes** (FPS³⁵) et nous nous donnons $\omega = 25$ FPS comme valeur de référence : cette valeur est inspirée de la norme SECAM qui définit le nombre

34. Toutes les tâches s'exécutent sur un même processeur.

35. FPS : Frame Per Second

d'images par secondes que doit afficher un dispositif de télévision pour donner l'illusion d'un mouvement fluide. Notons que cette grandeur peut également s'exprimer en Hertz (Hz)³⁶. En d'autres termes, *si le temps d'exécution par cycle pour une simulation réalisée à partir d'un modèle X sur un scénario s est en moyenne inférieur ou égal à $\frac{1}{\omega}$, le modèle X est jugé suffisamment performant pour le scénario.*

Afin d'évaluer les performances des deux modèles, en termes de temps de calcul, nous faisons varier le nombre d'agents de 500 à 5000 et nous reprenons les situations favorables à l'émergence des trois phénomènes sélectionnés au début de ce chapitre (effet de bord, formation de files, effet sablier).

Les temps de calcul par cycle pour la boucle de simulation principale (responsable de la mise à jour des positions et des vitesses) sont notés $TCC1(MIM)$ et $TCC1(RVO)$, pour les simulations réalisées à partir des modèles MIM et RVO respectivement, et sont déterminés d'après les formules 5.1 et 5.2 :

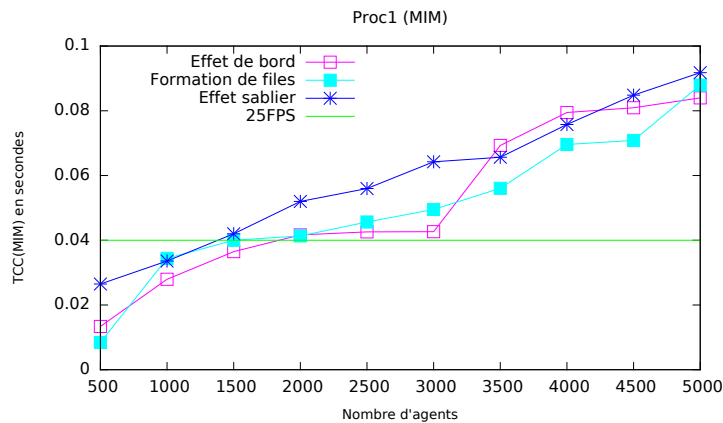
$$TCC1(MIM) = TCC1(\text{Moteur physique}) + \sum_{a_{MIM}} TCC1(a_{MIM}) \quad (5.1)$$

$$TCC1(RVO) = \sum_{a_{RVO}} TCC1(a_{RVO}) \quad (5.2)$$

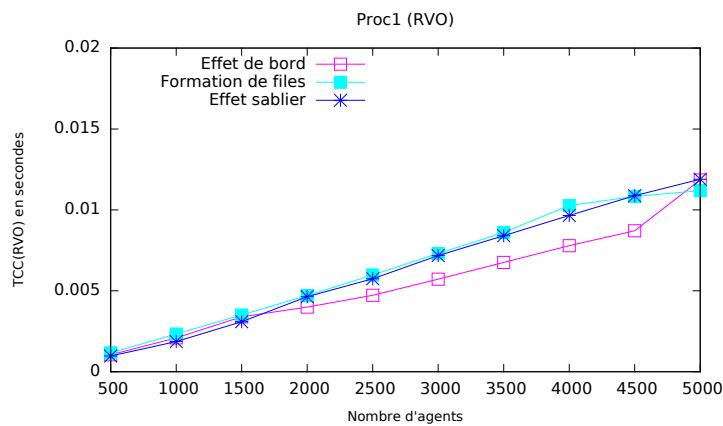
$TCC1(a_{MIM})$ représente le temps de calcul par cycle de l'algorithme 1 pour un agent a_{MIM} suivant le modèle MIM, et $TCC1(\text{Moteur Physique})$, le temps de calcul par cycle du moteur physique. $TCC1(a_{RVO})$ représente le temps de calcul par cycle que nécessite le calcul de la vitesse instantanée et la mise à jour de la position courante pour un agent a_{RVO} suivant le modèle RVO.

La différence de performance entre le modèle MIM et le modèle RVO se présente comme l'indique la figure 5.19(a).

36. $1\text{Hz} = 1\text{ s}^{-1}$



(a) TCC1(MIM)



(b) TCC1(RVO)

FIGURE 5.19 – Différence de performance entre le modèle MIM et le modèle RVO.

En termes de temps d'exécution par cycle, le modèle RVO s'avère moins coûteux que le modèle MIM sur les trois scénarios sélectionnés. Ce résultat n'est pas surprenant compte tenu des opérations de notifications et de réajustement d'itinéraire effectuées en plus dans le modèle MIM (voir algorithme 1). Le modèle RVO est suffisamment performant pour permettre une visualisation interactive des résultats pour chacun des trois scénarios d'après nos expérimentations (voir figure 5.19(b)).

Le modèle MIM reste suffisamment performant jusqu'à 1500 agents pour le scénario d'effet sablier. Au delà de 1500 agents, les performances du modèle, en l'état, et pour une simulation s'exécutant sur un seul processeur, sont limitées. Pour les scénarios de formation de files et d'effet de bord, le modèle MIM est suffisamment performant jusqu'à 2000 agents. Ces résultats sont encourageants d'autant plus qu'ils peuvent être améliorés en répartissant les différentes tâches sur différents processeurs si le support de simulation s'y prête.

Mise à jour des itinéraires

L'évolution du temps de calcul par cycle de mise à jour d'itinéraire (*Proc2*) se présente comme l'indique la figure 5.20. Pour cette évaluation, toutes les mises à jour ont été effectuées simultanément et le temps de calcul représenté en ordonnée est la somme des temps de calcul pour tous les agents. Nous signalons qu'il serait légitime de faire varier la fréquence de mise à jour d'un agent à un autre. Cette disposition aurait pour conséquence de diminuer la charge de calcul par cycle. L'exécution des mises à jour peut également être parallélisée.

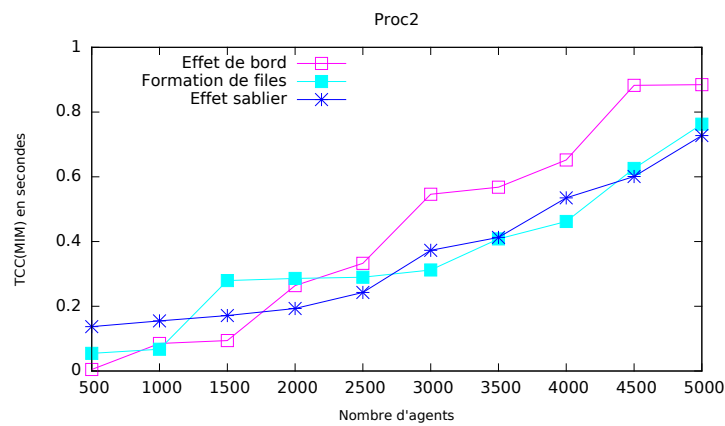


FIGURE 5.20 – Évolution du temps de calcul par cycle pour la mise à jour des itinéraires

Historisation des notifications

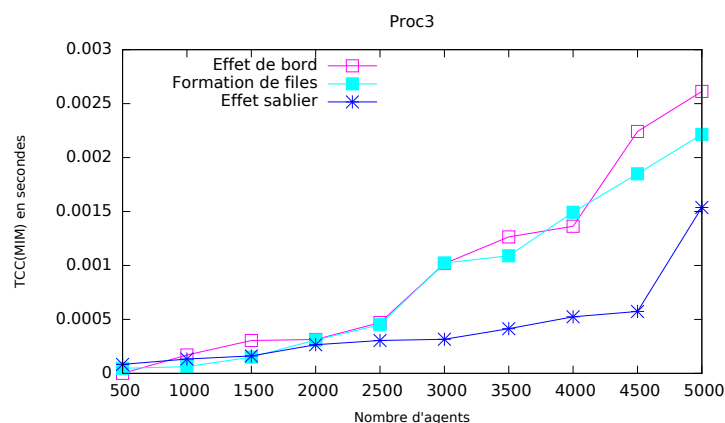


FIGURE 5.21 – Évolution du temps de calcul par cycle pour la mise à jour des historiques

La figure 5.21 présente l'évolution du temps de calcul par cycle pour la mise à jour des historiques (*Proc3*). La complexité de *Proc3* est fonction du nombre de notifications

à traiter par cycle, qui augmente nécessairement avec le nombre d'agents. Nous rappelons qu'il est envisageable de définir plusieurs *unités de traitement des notifications*, indépendantes les unes des autres, qui auraient en charge une zone déterminée de l'environnement. Le traitement des notifications pourrait ainsi être effectué en parallèle et serait encore plus efficace (cf. section 4.3.2).

Conclusion de l'évaluation des performances computationnelles

Les performances computationnelles du modèle MIM sont, sans surprise, inférieures à celle du modèle RVO. En effet, l'objectif n'était pas de faire mieux en termes de temps de calcul, mais de faire mieux en termes de crédibilité avec des performances suffisantes pour permettre une visualisation interactive des résultats.

Le modèle MIM est suffisamment performant jusqu'à 1500 agents pour le scénario d'effet sablier, et jusqu'à 2000 pour le scénarios de formation de files et d'effet de bord. Ces performances sont encourageantes et peuvent être améliorées sur un support de simulation proposant plusieurs processeurs. En effet, les simulations réalisées à partir du modèle MIM sont, par construction, parallélisables.

5.5 Synthèse de l'évaluation

L'objectif de cette évaluation était de discuter des performances de notre approche pour des simulations mettant en scène un nombre variable d'agents. Nous avons choisi de comparer notre modèle avec le modèle RVO (Van Den Berg *et al.*, 2010) et avons effectué une évaluation en deux phases.

La première phase avait pour but de juger des fonctionnalités de notre modèle dans des espaces peu ou moyennement congestionnés et de comparer les performances de notre modèle à celles du modèle RVO dans ces conditions. Sur la majorité des scénarios de comparaisons sélectionnés, nous avons pu constater que notre modèle était plus crédible que le modèle RVO **du point de vue d'un observateur non expert**. En effet, notre modèle reproduit des comportements individuels et de groupes plus conformes à la réalité d'après les observateurs (dépassement, formation en V).

La deuxième phase de l'évaluation a consisté à étendre la comparaison à des espaces plus congestionnés. Nous avons comparé non seulement les capacités des deux modèles à reproduire des phénomènes d'écoulement connus, mais aussi leur robustesse au passage à l'échelle. Nous avons simulé des situations favorables à l'émergence de trois phénomènes

d'écoulement à partir des deux modèles — les effets de bord, la formation de files, l'effet sablier (voir section 2.2) — et avons effectué une comparaison détaillée des performances suivant plusieurs aspects. Nous n'avons pas fait d'évaluation non experte pour ces situations car les phénomènes sont suffisamment étudiés dans la littérature et simples à observer. Par ailleurs, nous ne souhaitons pas alourdir le questionnaire d'évaluation pour les observateurs bénévoles.

Des points de vue visuel et énergétique, notre modèle est plus performant que le modèle RVO. D'un point de vue computationnel le modèle RVO est, sans surprise, plus performant que le modèle MIM. Ce résultat doit toutefois être nuancé car les simulations que nous avons mises en place à partir du modèle RVO ne font pas émerger les phénomènes attendus. Les performances computationnelles de notre modèle sont suffisantes pour permettre une visualisation interactive des résultats pour une grande quantité d'agents.

Un calibrage des algorithmes de planification est envisageable pour limiter la charge de calcul sans réduire l'efficacité (i.e, en garantissant qu'une mise à jour produise toujours un itinéraire plus crédible en termes de dépense énergétique). Celui-ci porterait sur la fréquence de mise à jour, le nombre d'itérations et le champs de perception pour l'exécution de l'algorithme tabou (voir section 4.4).

Dans le chapitre suivant nous abordons l'intégration de nos travaux dans la plate forme de simulation Terra Dynamica.

6 Intégration dans la plate-forme Terra Dynamica

Ce chapitre présente l'intégration de nos travaux dans le moteur de simulation du projet Terra Dynamica. Nous reviendrons sur les choix technologiques qui ont été faits et nous tâcherons de les motiver par rapport aux exigences du projet. Nous rappelons que notre travail de recherche a connu des évolutions après la fin officielle du projet, et donc, après la fin officielle des développements. Aussi n'avons nous pas pu intégrer toutes les spécificités de notre modèle (voir chapitre 4), notamment l'algorithme de recherche tabou. Toutefois, deux idées essentielles pour la mise en œuvre de notre modèle — à savoir, le principe d'influence/réaction et les interactions entre agents à travers un module de trafic — ont été mises en place, comme nous le verrons dans les paragraphes qui suivent.

Sommaire

6.1	Présentation générale des choix technologiques	112
6.1.1	Espace Navigable	113
6.1.2	Navigation bas niveau	116
6.2	Prise en compte de la sémantique	117
6.3	Synthèse de l'intégration	119

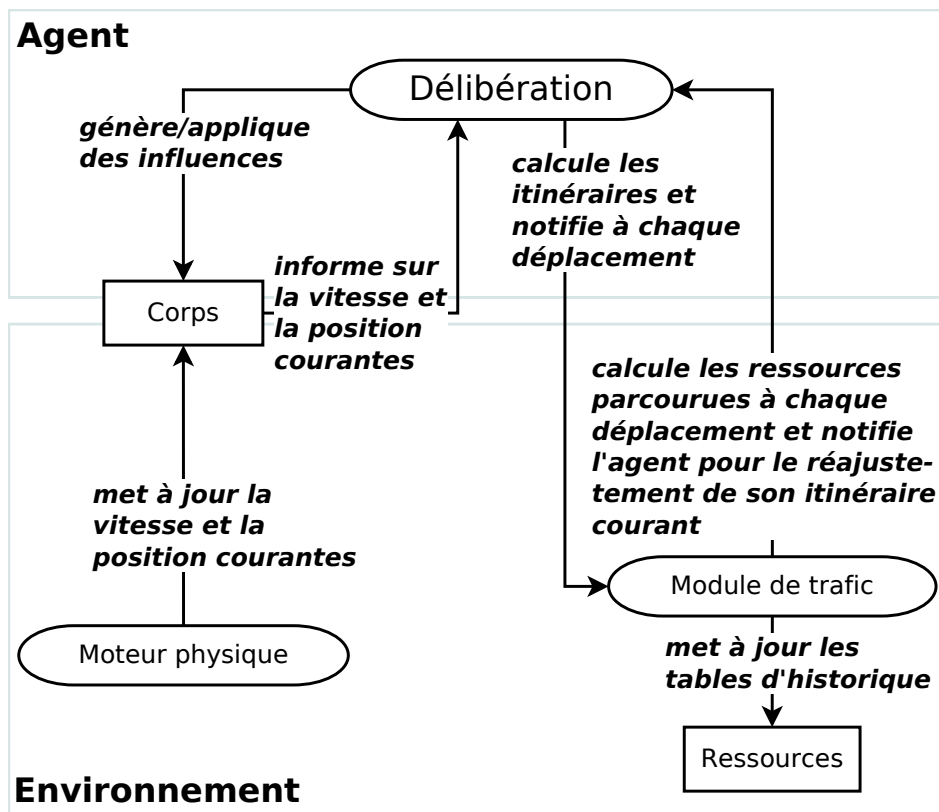


FIGURE 6.1 – Structure générale du modèle montrant les interactions entre les différents composants

6.1 Présentation générale des choix technologiques

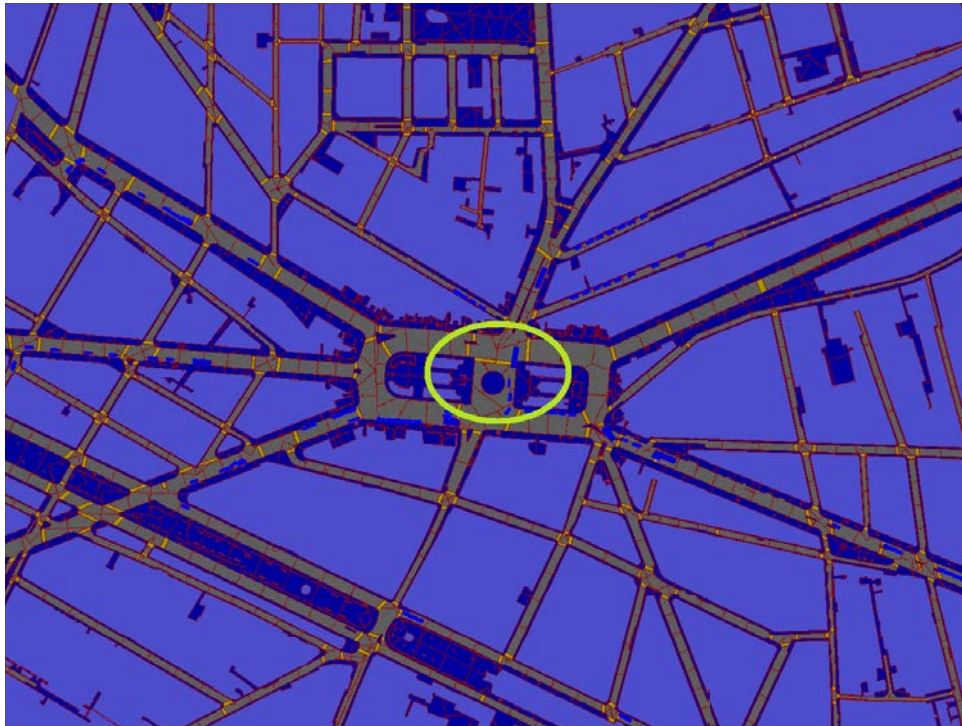
La figure 6.1 (copie de la figure 4.4) rappelle le schéma descriptif du modèle MIM. D’après notre formulation, les piétons sont des agents situés dans un environnement et interagissent entre eux via cet environnement. Le concept d’environnement que nous exploitons est concrètement inspiré des travaux de Weyns *et al.* (2006). L’environnement

structure l'espace navigable et définit un réseau de ressources de navigation; l'environnement définit la structure physique du monde, des objets en mouvement et des objets fixes. L'environnement (module de trafic) observe également le trafic à l'intérieur des ressources et définit des mesures dynamiques que les agents interprètent pour construire leurs itinéraires — ces mesures sont déduites de notifications que les agents envoient à l'environnement (module de trafic) au fur et à mesure qu'ils se déplacent. Nous nous inspirons du principe d'influence réaction pour implémenter le comportement des agents. L'environnement (moteur physique) est co-responsable de la trajectoire des agents — pour se déplacer vers leurs destinations, les agents influencent leur corps et l'environnement (moteur physique) réagit et génère une nouvelle vitesse instantanée, puis une nouvelle position conformes aux lois de la dynamique. Dans cette section, nous présentons les différents choix technologiques que nous avons faits pour intégrer notre modèle dans la plate-forme Terra Dynamica.

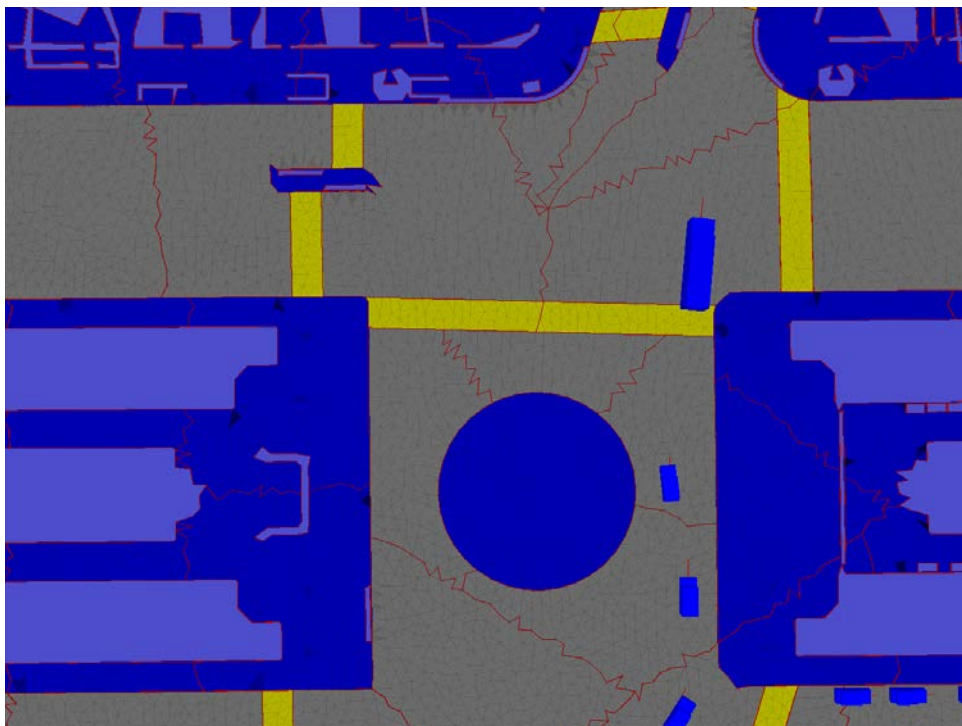
6.1.1 Espace Navigable

Comme nous l'avons signalé dans le chapitre 1, le projet Terra Dynamica fait suite au projet Terra Numerica, dont l'objectif était de définir des technologies permettant de numériser l'espace urbain. Ce travail (de numérisation) a servi de point départ pour la définition d'une représentation adéquate de notre espace navigable. Nous avons souhaité que l'espace navigable — i.e. l'espace dans lequel ont lieu les déplacements des entités mobiles — soit reproduit sous la forme d'une triangulation de Delaunay (De Berg *et al.*, 2008, chap. 9). Cette représentation permet de recouvrir l'ensemble de l'espace, et est suffisamment détaillée pour faciliter la mise en œuvre des déplacements suivant notre formulation. De plus, elle donne la possibilité de définir des surfaces navigables sémantiquement séparables — exemple : chaussée, trottoir, passage piétons, etc. — en agrégeant des ressources élémentaires. Ces surfaces peuvent être exploitées sans ambiguïté pour définir des plans hiérarchiques (nous reviendrons sur cette possibilité dans la section 7.2). Nous avons suggéré que la taille des ressources soit bornée par un nombre d'agents maximal que nous avons assimilé à q_{max} (voir section 4.2 pour la définition de q_{max}).

La figure 6.2(a) montre une vue de la place de la république (Paris 10^e) obtenue à partir des données d'information géographique exploitées dans le cadre de Terra Numerica. Déjà sur cette figure, qui représente un plan détaillé de la voirie de ce quartier, nous pouvons remarquer que plusieurs surfaces sont colorées de manière unie. Les couleurs «bleu clair», «bleu foncé», «gris», «jaune» représentent respectivement les **empreintes de bâtiments**, les **trottoirs** (T), les **chaussées** (C) et les **passages piétons** (P).



(a) Plan détaillé de la voirie



(b) Détail de la triangulation du terrain

FIGURE 6.2 – Place de la république (Paris 10^e)

La figure 6.2(b) montre les détails de la triangulation de la zone encerclée en vert sur la figure 6.2(a). Les surfaces coloriées sont des agrégations de ressources élémentaires. La triangulation du terrain nous a été fournie selon nos spécifications sous la forme d'un fichier «obj». Ce format est un standard qui permet de décrire des objets 3D en les décomposant sous forme de mailles. La première partie d'un fichier «obj» énumère les sommets utilisés pour décrire les mailles. Chaque sommet est représenté par une ligne commençant par «v» et se terminant par les coordonnées cartésiennes du sommet — la position de la ligne dans l'énumération détermine l'identifiant du sommet. La deuxième partie d'un fichier «obj» énumère l'ensemble des mailles utilisées pour décrire l'objet tout entier. Chaque maille est représentée par une ligne commençant par «f» et se terminant par la liste des identifiants de sommets constituant le contour de la maille. Il est possible d'attribuer des textures à un ensemble de mailles en rajoutant une ligne introduite par le mot clef «usemtl» avant l'énumération des mailles concernées

Le contenu du fichier «obj» qui nous a été fourni se présente comme l'indique la figure 6.3.

```
#####
# Object terrain.obj
#####
# le symbole (#) signale un commentaire
v 1753.117646 2555.976304 36.892699
v 1755.039937 2554.233633 36.900002
v 1755.132587 2554.137937 36.900002
v 1767.649830 2564.007928 37.000000
...
# code sémantique : type de surface et nom de la voirie
usemtl TEXTURE_TYPE_NOMDELAVOIRIE_IDENTIFIANT
f 462809 245606 202983
f 202983 245606 32696
f 6851 245606 462809
f 6851 133882 245606
f 66347 133882 6851
f 32696 77457 202983
...
```

FIGURE 6.3 – Aperçu du fichier «obj» décrivant l'espace navigable

Nous avons exploité des lignes introduites par le mot clef «usemtl» pour décrire des surfaces *sémiotiquement séparables* (voir figure 6.3). Dans notre cas, le mot clef «usemtl» est suivi d'une chaîne de caractère de la forme

`TEXTURE_TYPE_NOMDELAVOIRIE_IDENTIFIANT`

où :

- `TEXTURE` désigne la texture à attribuer aux mailles (qui se réduit à un code couleur),
- `NOMDELAVOIRIE` désigne le nom de la voirie (ex : «rue soufflot» ou «place de la république»).
- `TYPE` désigne la valeur sémantique de la surface navigable, choisi parmi «T» (Trottoir), «C» (Chaussée) et «P» (Passage piétons).
- `IDENTIFIANT` désigne l'identifiant de l'ensemble des mailles

Pour la construction de l'espace navigable, un fichier «obj», tel que nous venons de le présenter, sert de fichier de configuration. Au lancement de la simulation, nous déduisons notre réseau de ressources à partir de ce fichier, ainsi qu'un graphe topologique permettant de faire de la planification hiérarchique (de surfaces sémantiques en surfaces sémantiques).

6.1.2 Navigation bas niveau

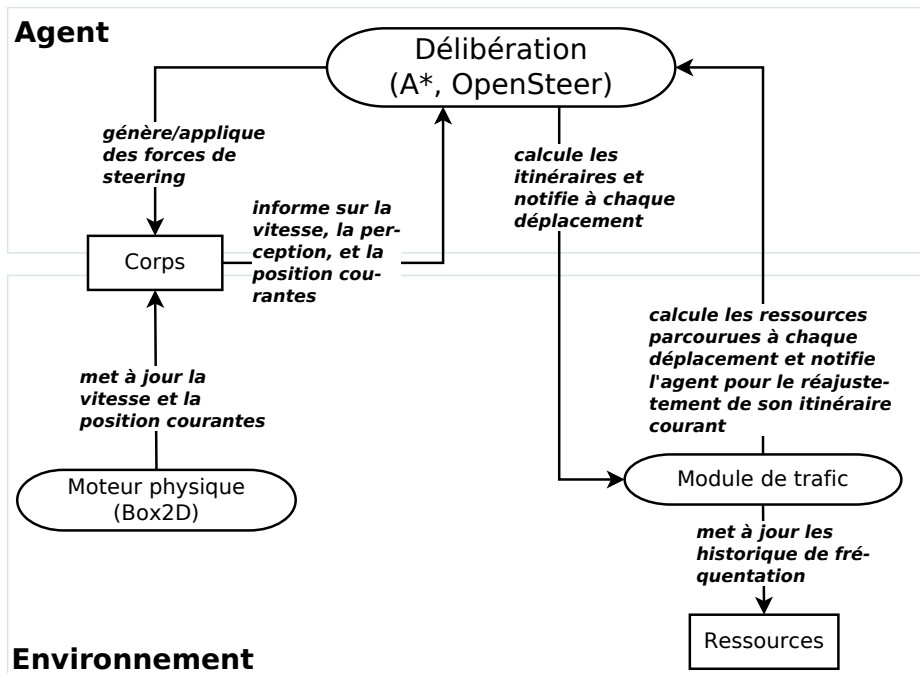


FIGURE 6.4 – Architecture détaillée du modèle intégré dans la plate-forme

Dans cette section, nous présentons les choix que nous avons faits pour mettre en œuvre la navigation des piétons suivant notre modèle. La figure 6.4 schématise le modèle tel qu'il a été intégré dans la plate-forme. Nous avons exploité des bibliothèques de

programmation existantes — *Box2D*, pour implémenter un moteur physique, *OpenSteer* pour implémenter des algorithmes de suivi de chemin et d'évitement de collision suivant le formalisme des modèles de Steering (voir section 3.3.2) — toutes ces bibliothèques sont libres et disponibles en ligne. L'algorithme de planification que nous avons intégré est un algorithme de type A^* .

Rappelons qu'un algorithme A^* prend en entrée un graphe, un nœud de départ A et un nœud d'arrivée B , et consiste à construire un chemin sous-optimal entre r_A et r_B en explorant intelligemment (grâce à une heuristique) le voisinage de r_A . Partant du chemin initial, l'algorithme maintient une file de priorité de nœuds à parcourir. Le coût $f(r_i)$ d'un nœud r_i de la file s'écrit $f(r_i) = g(r_i) + h(r_i)$ où $g(r_i)$ désigne le coût du chemin allant de r_A à r_i , et $h(r_i)$, communément appelée **fonction heuristique**, est une estimation du coût du chemin à parcourir pour aller de r_i à r_B .

L'algorithme A^* que nous avons implémenté pour la planification d'itinéraire définit les fonctions g et h de la manière suivante :

$$g(r_i) = \sum_{0 \leq j < i} \left(L_{r_j, r_{j+1}} + \frac{q_{r_j} + q_{r_{j+1}}}{2 \cdot q_{max}} \cdot DENSITY_{F_{r_j, r_{j+1}}} + ROAD_{F_{r_j, r_{j+1}}} \right) \quad (6.1)$$

$$h(r_i) = L_{r_i, r_B} \quad (6.2)$$

Où :

- $L_{r_j, r_{j+1}}$ désigne la distance euclidienne (de centre à centre) entre une ressource située sur le chemin allant de r_A à r_i , r_j , et la ressource suivante, r_{j+1} .
- q_{r_j} (respectivement $q_{r_{j+1}}$) désigne la fréquentation moyenne d'une ressource r_j .
- L_{r_i, r_B} désigne la distance euclidienne (de centre à centre) entre r_i et r_B .
- $DENSITY_{F_{r_j, r_{j+1}}}$ désigne un *facteur de densité* dont la valeur est fixée de manière ad-hoc. Ce facteur permet de pénaliser les ressources les plus fréquentées dans l'exploration. $ROAD_{F_{r_j, r_{j+1}}}$ désigne un coût supplémentaire qui a une valeur non nulle lorsqu'une des ressources est située sur la chaussée. Cela permet de pénaliser les chemins qui passent par la chaussée. Ce coût peut être modifié dynamiquement en fonction du trafic véhicule sur la chaussée.

6.2 Prise en compte de la sémantique

Une importante partie des situations que nous souhaitons mettre en scène se déroulent dans des zones d'interaction entre piétons et véhicules (chaussée, passage piétons). Le module d'intelligence artificielle bas niveau que nous mettons en place permet de prendre

en charge ces situations. Il s'appuie sur une décomposition de l'espace en surface sémantiquement séparables. La sémantique du sol est accessible à travers les ressources de navigation. Nous avons pu mettre en place des profils de piétons qui prennent en compte de diverses manières le trafic véhicule et les feux de circulations. Nous ne faisons qu'évoquer ces travaux dans ce manuscrit, qui ne constituent pas l'essentiel de notre contribution scientifique.

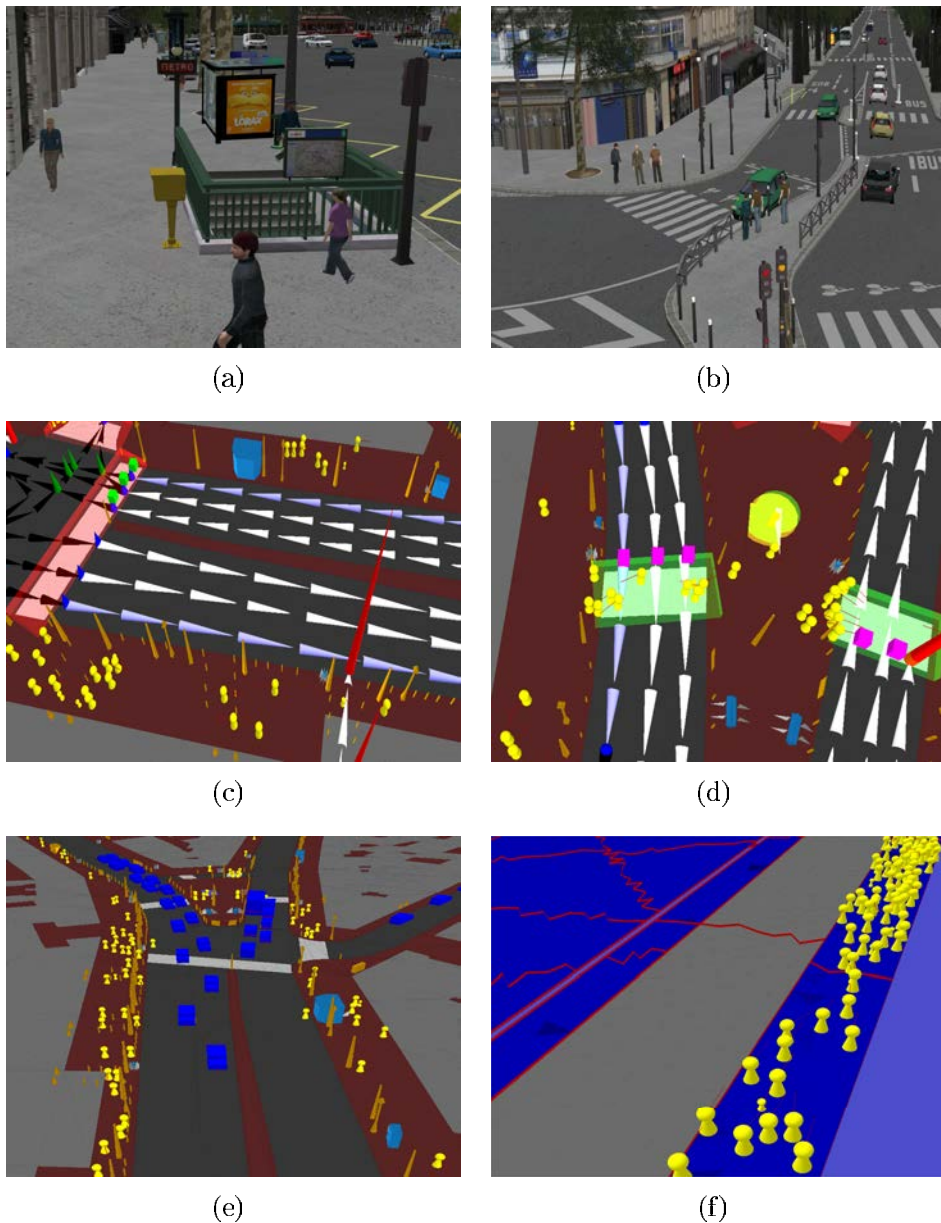


FIGURE 6.5 – Scènes de simulation réalisées à partir du modèle intégré dans la plate-forme Terra Dynamica.

La figure 6.5 donne un aperçu des scènes de simulation réalisées à partir de notre mod-

ule d'intelligence artificielle bas niveau³⁷. Sur les figures 6.5(a) et 6.5(b) nous présentons un rendu graphique complet de la simulation incluant des personnages en trois dimensions et les infrastructures de la ville. Notons que les feux de circulation que nous apercevons sur ces figures sont dynamiques (i.e. changent de couleur) et pris en compte par les piétons dans leur décisions. Les figures 6.5(c), 6.5(d), 6.5(e) et 6.5(f) montrent un rendu graphique moins détaillé sur lesquels apparaissent des piétons et des véhicules représentés par leur enveloppes physiques (bonhommes en jaune pour les piétons et pavés bleu foncé pour les véhicules).

6.3 Synthèse de l'intégration

Notre travail d'intégration s'est déroulé dans un contexte particulier puisqu'il était question de faire évoluer un module d'IA bas niveau conçu à partir d'outils issus de l'existant. Nous avons parallèlement défini le modèle MIM dans le but de répondre aux limitations classiques des approches microscopiques (voir chapitre 1). Ces approches sont les plus intuitives pour la mise en œuvre d'une simulation des déplacements mais le cadre formel permettant d'appréhender la complexité des comportements des piétons est souvent ambigu.

Un bonne partie du modèle MIM a été intégrée dans la plate-forme Terra Dynamica, notamment :

- le réseau de ressources,
- le mécanisme de notifications et d'historisation pour la maintenance des ressources,
- les composants du modèle agent, à savoir, le corps et le module de délibération
- le moteur physique

L'algorithme de recherche dynamique n'a pas été intégré au moment où nous rédigeons ce document, ni le processus de génération d'influences inspiré du paradigme des V-Obstacles. À la place, nous avons intégré un algorithme de type A^* , et utilisé la bibliothèque de programmation OpenSteer, permettant d'implémenter des modèles de steering. L'implémentation de l'algorithme tabou et du processus de génération d'influence parachèveraient l'intégration de notre modèle tel qu'il a été présenté dans ce document.

Dans le chapitre suivant, nous discutons des apports et des limitations de notre approche et présentons deux principales perspectives.

37. Nous utiliserons cette impression pour désigner notre modèle tel qu'il a été intégré dans la plate-forme Terra Dynamica.

7 Conclusions et Perspectives

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse générale de nos travaux. Nous commençons par résumer l'essentiel de notre contribution scientifique en rappelant la problématique que nous avons traitée. Nous faisons ensuite une revue des apports et des limitations du modèle MIM et présentons quelques perspectives pour étendre ses fonctionnalités.

Sommaire

7.1	Résumé de la contribution scientifique de la thèse	122
7.2	Amélioration du modèle MIM	124
7.2.1	Modélisation de comportements spécifiques de groupe	124
7.2.2	Prise en compte de la dangerosité du trafic grâce à un module sémantique	125
7.2.3	Agrégation de ressources	125
7.2.4	Prise en compte des infrastructures d'écoulement de trafic . . .	125

7.1 Résumé de la contribution scientifique de la thèse

Rappelons que cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche et développement, Terra Dynamica, dont le but est de développer des technologies de simulation permettant de reproduire le comportement humain dans une ville de manière crédible. Au début de nos travaux, nous avons été amené à mettre en place des algorithmes de déplacements fonctionnels en nous inspirant de l'existant. Nous avons alors remarqué que les approches microscopiques, qui sont les plus utilisées parce que plus intelligibles, sont handicapantes pour la simulation d'un nombre variable d'acteurs. En effet, ces approches décomposent l'exercice en trois étapes : la définition de l'espace navigable, la planification des chemins, le suivi de chemin et la coordination des déplacements. Cette manière de faire pose une problématique à la fois technique — suivi et coordination sont incompatibles en cas de forte densité, la complexité de la coordination augmente avec le nombre d'acteurs à simuler — et scientifique — il faut éviter la confusion entre *action* et *effet souhaité des actions*, les simulations doivent pouvoir reproduire les phénomènes observables dans la réalité quelque soit le niveau de congestion.

Nous nous sommes proposés de rechercher une solution satisfaisante, en clarifiant le cadre formel permettant d'appréhender la complexité du comportement et de la simulation.

Premièrement, nous avons étudié la notion de crédibilité à travers les propriétés empiriques du déplacement des piétons et à travers des travaux en psychologie. Cette étude nous a amené à conclure qu'un déplacement crédible est un déplacement économe en énergie métabolique. Plusieurs travaux de recherche en psychologie du comportement soulignent, en effet, l'importance de l'énergie métabolique dans la coordination, le contrôle et l'apprentissage du mouvement chez les êtres humains en particulier. Newell et Sparrow

(1998) affirment que la régulation de la quantité d'énergie métabolique dépensée permet d'expliquer la dynamique des mouvements des organismes vivants à court et à long terme (Newell et Sparrow, 1998, Page 2). Au terme de cette étude, nous retenons finalement que les piétons sont des agents situés dans un environnement qui planifient leurs déplacements de manière à minimiser leur dépense énergétique — telle qu'ils l'estiment — en fonction de la dynamique de l'environnement, de leurs dispositions internes et de leur destination. Cette idée procède directement du principe du moindre effort (Zipf, 1949) appliqué aux déplacements.

Deuxièmement, nous avons étudié les modèles existants dans le but d'identifier la manière la plus pertinente d'implémenter les déplacements de piétons pour la simulation en temps réel. Nous remarquons que la pratique courante tend à opposer deux visions complémentaires du déplacement : le fait que les piétons soient souverains dans leurs choix, et le fait que les piétons soient soumis à des lois d'écoulement. Notre démarche a été de préserver ces deux réalités pour définir le comportement des agents avec le maximum de rigueur. Nous proposons une formulation multi-agents suivant laquelle les piétons sont des agents **situés** dans un environnement qui se déplacent d'un point A à un point B en essayant de minimiser leur dépense énergétique. Nous exploitons le cadre formel proposé par les jeux de congestion (Rosenthal, 1973) pour appréhender la complexité du comportement de navigation, et nous introduisons la notion de ressources de navigation. Les ressources de navigation sont utilisées par les agents pour construire leurs itinéraires. Elles définissent des mesures dynamiques qui permettent aux agents d'apprécier leurs dépenses de manière consistante sans négliger leurs paramètres individuels. Ces mesures sont maintenues en temps réels à partir du déplacement des agents.

Troisièmement, nous avons considéré le principe influence /réaction comme théorie de l'action et nous avons proposé un algorithme tabou pour implémenter la stratégie de déplacement des agents. Cet algorithme procède à une recherche itérative qui consiste à mettre à jour un itinéraire courant dans les limites du champs de perception de l'agent. Les mesures dynamiques utilisées pour la mise à jour proviennent des ressources de navigation et sont réinterprétées individuellement par l'agent : la décision d'un agent tient compte du comportements des autres agents par la médiation des ressources de navigation. En cela, notre modèle possède de sérieux atouts en faveur de la crédibilité et du passage à l'échelle.

Enfin, nous avons utilisé des concepts issus du paradigme multi-agents qui s'avèrent particulièrement adaptés pour appréhender la complexité de la simulation (Weyns *et al.*, 2006; Michel, 2007). L'environnement est vu comme un composant à part entière du système, ontologiquement différent des agents — l'environnement observe le trafic au sein

des ressources et maintient les données dynamique qui permettent aux agents d'estimer leur dépenses de manière pertinente ; l'environnement est également le garant des lois de la dynamique des objets physiques et coordonne le mouvement des agents. Une importante part de la dynamique de la simulation se trouve ainsi déléguée à l'environnement sans conséquence sur l'autonomie des agents. Cette séparation favorise une implémentation rigoureuse du comportement, et de surcroît, la parallélisation des calculs et le passage à l'échelle.

Nous avons comparé notre modèle avec le modèle RVO, qui est un modèle microscopique robuste au passage à l'échelle et efficace en termes d'évitement de collisions. L'objectif de notre comparaison était non seulement de mettre en avant l'originalité de notre approche par rapport à une approche microscopique classique, mais aussi de suggérer des évolutions simples pour améliorer l'existant. Les comparaisons ont été effectuées sur plusieurs scénarios et il en ressort que notre modèle propose des comportements plus réalistes quelque soit le nombre d'agents. En cas de forte densité, notre modèle reproduit des phénomènes d'écoulement connus tels que : l'effet de bord (Still, 2000), la formation de file (Zhang *et al.*, 2012), et l'effet sablier (Daamen et Hoogendoorn, 2003). Les performances computationnelles permettent une visualisation interactive des résultats jusqu'à un nombre d'agents compris entre 1000 à 2000 sur une machine monoprocesseur standard. Au delà, nous recommandons un support de simulation multiprocesseur pour exploiter tout le potentiel du modèle et obtenir les meilleures performances.

7.2 Amélioration du modèle MIM

Dans cette section, nous signalons quelques fonctionnalités qui ne sont pas nativement prises en charge par notre modèle, mais qui pourraient facilement être intégrées.

7.2.1 Modélisation de comportements spécifiques de groupe

Les interactions que nous considérons se font uniquement suivant le référentiel véhiculaire (voir section 3.3). Nous ne proposons pas, dans ce manuscrit, des fonctionnalités permettant de gérer des déplacements en groupe : défilés, formations militaires, familles, groupe d'amis, etc. Pour intégrer ce type de fonctionnalités, une piste intéressante serait d'introduire des préférences dans l'heuristique de planification, ou dans la manière de sélectionner les influences parmi les vitesses admissibles.

7.2.2 Prise en compte de la dangerosité du trafic grâce à un module sémantique

La prise en compte de la sémantique des surfaces navigables est facilitée par le modèle de données qui définit l'espace navigable. Cependant le modèle agent pourrait être enrichi d'une couche sémantique supplémentaire et indépendante qui rendrait compte, par exemple, de la dangerosité du trafic véhicule sur la chaussée. Dans (Harkouken-Saiah *et al.*, 2011), nous développons cette possibilité et proposons des pistes pour la définition d'un modèle de déplacements de piétons qui exploite un module sémantique.

7.2.3 Agrégation de ressources

Les ressources de navigation élémentaires peuvent être agrégées en zones dont le fonctionnement serait similaire aux ressources élémentaires qui les constituent — i.e. ces zones définiraient également des taux de fréquentation, des fréquences d'arrivée et de départ, etc. Comme nous l'avons déjà évoqué, les surfaces sémantiquement séparables sont de bonnes candidates pour définir le premier niveau d'agrégation. L'introduction de ce premier niveau permettrait de hiérarchiser intuitivement la planification tout en prenant en compte rigoureusement de la sémantique de l'espace navigable. D'autres niveaux peuvent être envisagés (rue, quartier, etc.) à condition de clarifier la manière dont les agents perçoivent le trafic au sein d'une agrégation de ressources.

7.2.4 Prise en compte des infrastructures d'écoulement de trafic

Pour mettre en place notre module de trafic, nous avons exploité l'analogie avec les files d'attente. Suivant cette analogie, il est possible de prédire la *qualité* du trafic au sein d'une ressource de navigation si les politiques de service au sein de la ressource, et les lois de probabilités sur les instants d'arrivée et de sortie sont connues (Zukerman, 2008). Les politiques de service, dans le cadre d'une file d'attente, prescrivent la manière dont le service est organisé dans la file. Nous pouvons citer en guise d'exemple, les politiques FIFO (premier arrivé premier servi), LIFO (dernier arrivé premier servi), etc. (Zukerman, 2008)

L'analogie entre ressources de navigation et files d'attente nous semble particulièrement intéressante pour simuler des déplacements de piétons dans un milieu urbain. Elle pourrait être exploitée pour intégrer des objets mécaniques (escalator, ascenseur, tourniquet, tapis roulant, etc.) ou sémantiques (signalisation horizontale ou verticale) aux fonctionnements complexes, utilisés pour faciliter l'écoulement du trafic piétons dans les envi-



FIGURE 7.1 – Illustration d'un couloir de gare contenant deux tapis roulants séparés par une allée centrale

ronnements urbains. Ces objets pourraient être traités comme des ressources de navigation dont les conditions d'utilisation sont renseignées par une politique de service. Le trafic au sein de ces ressources serait traduit de la même manière que n'importe quelle autre ressource, et les piétons pourraient tenir compte de ces objets dans leurs plans.

Prenons l'exemple des tapis roulants, comme il en existe dans les couloirs des gares de grandes métropoles. La figure 7.1 montre un exemple de couloir de gare contenant deux tapis roulants évoluant dans deux sens opposés, séparés par une allée centrale. La figure 7.2(a) est une représentation schématique de ce couloir de station divisée en cinq grandes ressources. Les ressources X et Y représentent les deux tapis roulants. La ressource A est située à l'arrière du tapis Y (à l'avant du tapis X). La ressource C représente l'allée centrale qui sépare latéralement les deux tapis roulants. La ressource B est située à l'avant du tapis Y (à l'arrière du tapis X). Les conditions d'utilisation des ressources X et Y peuvent être renseignées par une politique de service qui prescrit, par exemple, le point d'entrée et le point de sortie, la manière de se tenir une fois sur la ressource, etc. : ces informations seraient fournies par l'environnement.

Pour une simulation réalisée dans l'environnement de cet exemple, le module de trafic se chargerait tout simplement de rendre compte du trafic avec les mêmes mesures dynamiques que nous avons présentées dans la section 4.2.1. La figure 7.2(b) représente le graphe de navigation qui découle de la structure topologique décrite dans la figure 7.2(a) et qui pourrait être concrètement exploité pour la planification des itinéraires.

Une telle démarche suppose d'adapter le processus décisionnel des agents de manière à ce qu'ils puissent percevoir les politiques de service, et choisir ou non de les respecter, le cas échéant.

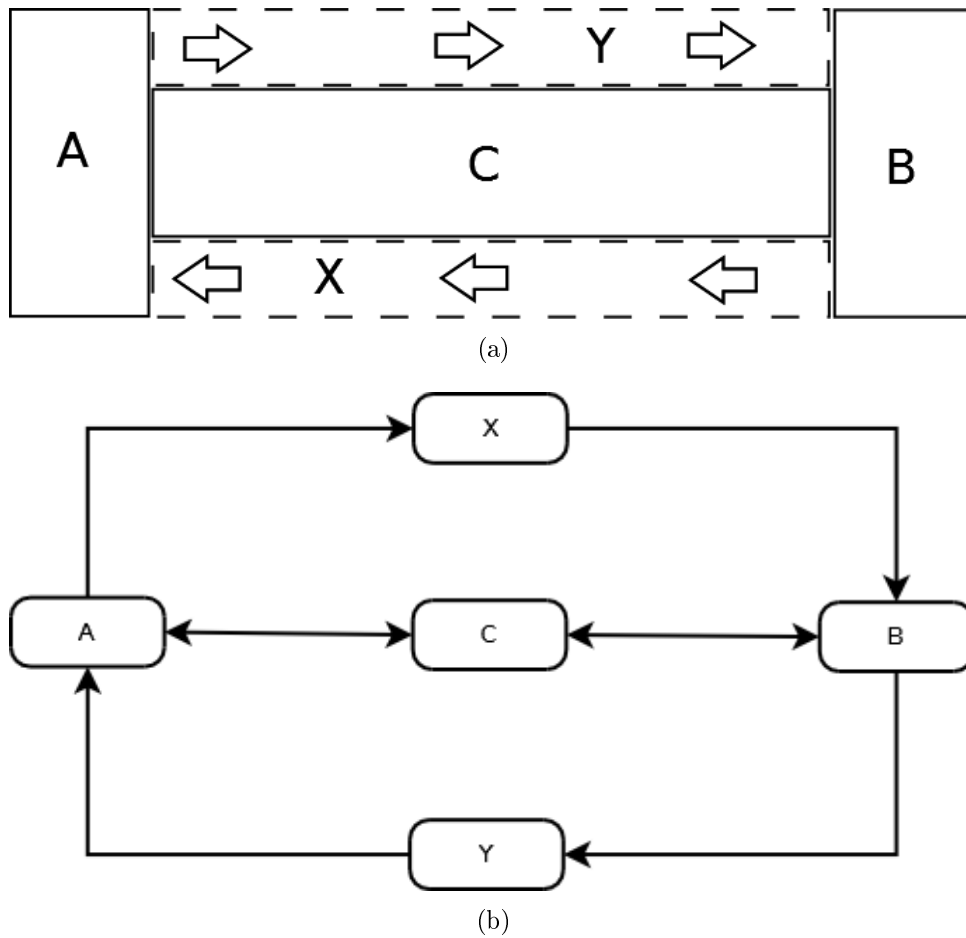


FIGURE 7.2 – Représentation schématique d'un couloir de gare contenant deux tapis roulants. La figure (a) décrit une structure topologique du sol, inspiré de la figure 7.1. La figure (b) représente un graphe de navigation orienté qui se déduit de cette structure. Deux ressources r_i et r_j sont liées dans ce graphe s'il est possible de se déplacer de r_i à r_j

A Développement du modèle MIM

Dans cette annexe nous décrivons l'implémentation du modèle MIM qui a été utilisée pour les expérimentations. Nous expliquons essentiellement comment nous exploitons RVOLib, qui est une bibliothèque de programmation proposée par les auteurs du modèle RVO et disponible en libre téléchargement³⁸. Le modèle RVO définit un système multi-agent pour la navigation en temps réel dans lequel les agents s'évitent entre eux sans communication explicite — chaque agent suppose juste que les autres agents utilisent le même mécanisme d'évitement de collision. Le paradigme d'évitement de collision est inspiré des V-Obstacles (Fiorini et Shiller, 1993, 1998; Shiller *et al.*, 2001) et l'action de déplacement est modélisé par un vecteur vitesse. Les auteurs du modèle ont récemment proposé une amélioration — ORCA (Optimal Reciprocal Collision Avoidance) — plus efficace en termes d'évitement de collisions et plus économe en ressources de calcul, dont une implémentation est également disponible via la bibliothèque RVOLib. Les agents s'évitent toujours sans communication explicite, mais les conditions permettant de délimiter l'ensemble de vitesses admissibles sont plus rigoureusement définies. Nous ne revenons pas sur les spécifications de l'extension et renvoyons le lecteur à l'article original pour plus de détails (Van Den Berg *et al.*, 2010). Concrètement, c'est l'extension ORCA que nous avons utilisée pour l'évaluation, mais nous avons maintenu la dénomination «RVO» pour simplifier la présentation.

38. <http://gamma.cs.unc.edu/RVO2>

Sommaire

A.1	Présentation de la bibliothèque RVOLib	131
A.2	Modèle MIM	132
A.2.1	Modélisation d'un agent	134
A.2.2	Modélisation de l'environnement	135
A.2.3	Utilisation de RVOLib	135

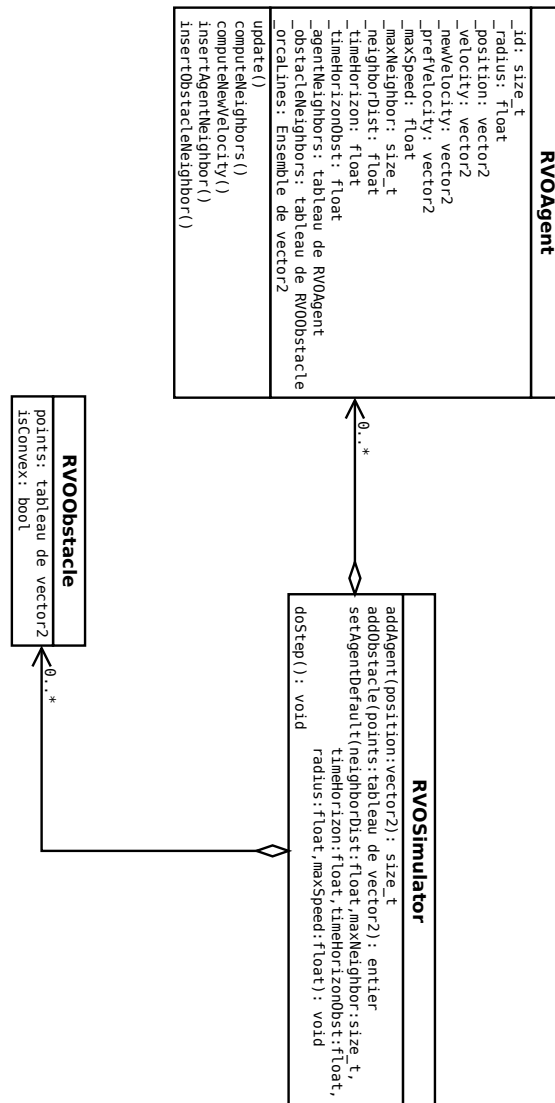


FIGURE A.1 – Diagramme UML de la bibliothèque RVOLib

A.1 Présentation de la bibliothèque RVOLib

La figure A.1 donne une vision synthétique du diagramme UML qui structure la bibliothèque RVOLib. La classe *RVO Simulator* définit le simulateur et la classe *RVO Agent*.

Tableau A.1 – Méthodes de la classe *RVO Simulator*

Méthodes	Commentaires
<i>addAgent</i>	ajoute un agent à une position donnée
<i>addObstacle</i>	ajoute un obstacle sous forme de polygone convexe ou concave
<i>doStep</i>	déclenche l'exécution d'un pas de simulation
<i>setAgentDefaults</i>	définit les paramètres par défaut pour l'instanciation d'un agent RVO

Tableau A.2 – Méthodes de la classe *RVO Agent*

Méthodes	Commentaires
<i>update</i>	calcule la vitesse instantanée, puis la nouvelle position de l'agent
<i>computeNeighbors</i>	met à jour le voisinage immédiat de l'agent
<i>computeNewVelocity</i>	calcule la nouvelle vitesse instantanée à partir des vitesses admissibles

À chaque pas de simulation, les agents calculent une nouvelle vitesse de déplacement (proche de leur vitesse désirée), puis leur nouvelle position via la méthode *update*. La méthode *update* exécute séquentiellement les méthodes *computeNeighbor* et *computeNewVelocity*, toujours définies par la classe *RVO Agent*, pour déterminer une nouvelle vitesse instantanée : *computeNeighbor* met à jour le voisinage immédiat de l'agent, i.e. l'ensemble des agents et des obstacles fixes avec lesquels une collision est imminente ; *computeNewVelocity* calcule une nouvelle vitesse instantanée en fonction du voisinage immédiat. L'exécution d'un pas de simulation est déclenchée par la méthode *doStep* de la classe *RVO Simulator*.

Le tableau A.1 résume les méthodes de la classe *RVO Simulator*, et les tableaux A.3 et A.2 résument respectivement les attributs et méthodes de la classe *RVO Agent*.

Tableau A.3 – Attributs de la classe *RVOAgent*

Méthodes	Commentaires
<i>_agentNeighbors</i>	table des voisins avec lesquels une collision est imminente
<i>_maxNeighbors</i>	nombre maximal de voisins à prendre en compte pour l'évitement de collision
<i>_maxSpeed</i>	vitesse (intensité) maximale de l'agent
<i>_neighborDist</i>	champ de perception
<i>_newVelocity</i>	nouvelle vitesse de déplacement
<i>_obstacleNeighbors</i>	table des obstacles avec lesquels une collision est imminente
<i>_orcaLines</i>	ensemble des vitesses admissibles
<i>_position</i>	position de l'agent dans l'environnement
<i>_prefVelocity</i>	vitesse désirée
<i>_radius</i>	rayon de l'enveloppe physique de l'agent
<i>_timeHorizon</i>	temps d'anticipation pour les collision avec les autres agents
<i>_timeHorizonObst</i>	temps d'anticipation pour les collisions avec les obstacles fixes
<i>_velocity</i>	vitesse instantanée

A.2 Modèle MIM

L'un des principales originalités de notre approche est l'utilisation de l'environnement comme composant indépendant du système ontologiquement différent des agents. Cette originalité se traduit concrètement par l'implémentation d'un modèle d'environnement possédant sa dynamique propre et médiateur des interactions entre agents.

La figure A.2 présente le diagramme UML utilisé pour l'implémentation du modèle MIM. Dans cette section, nous commentons la composition du diagramme et nous expliquons comment nous réutilisons les fonctionnalités de *RVOLib*.

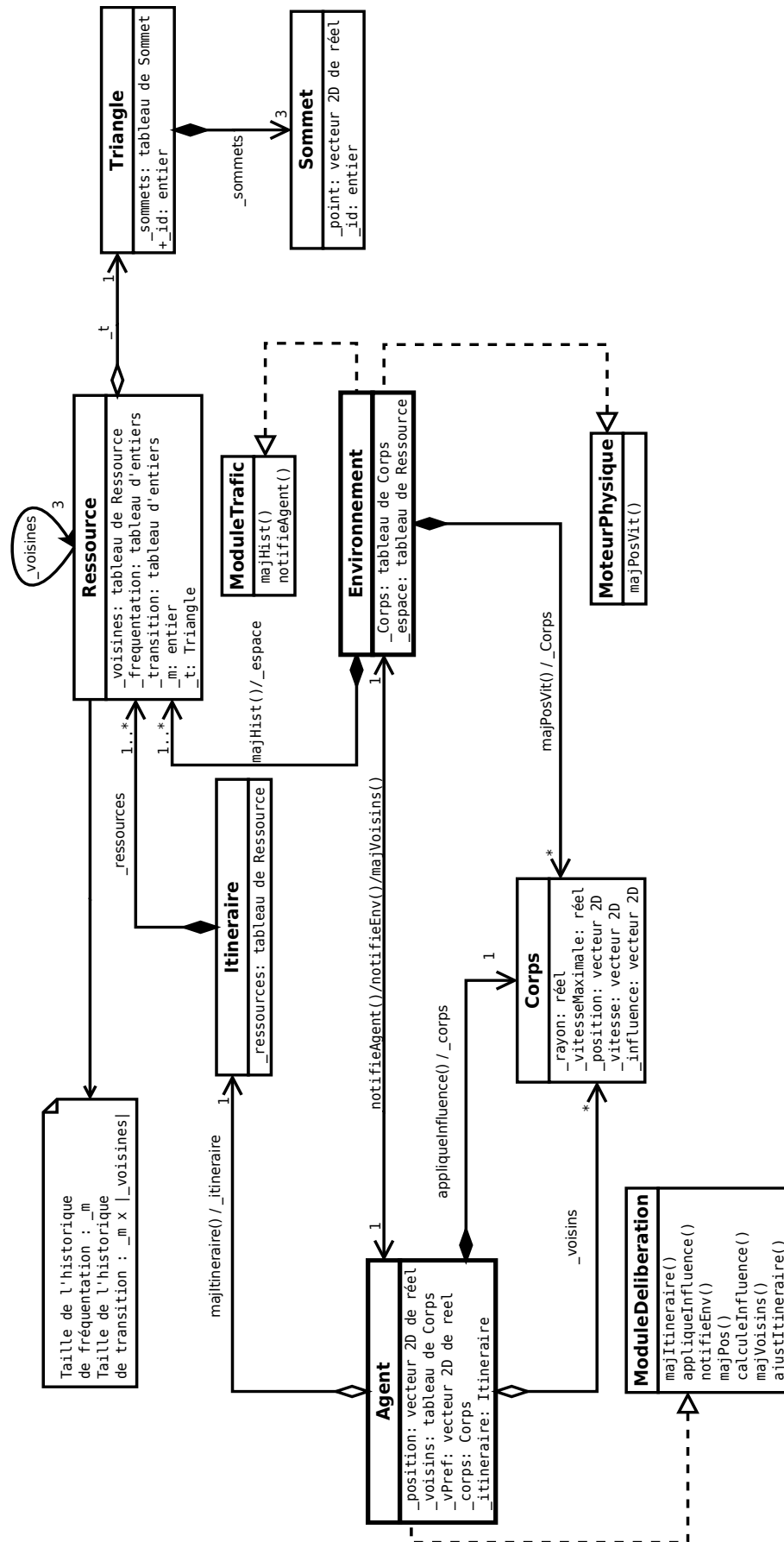


FIGURE A.2 – diagramme UML utilisé pour l'implémentation du modèle MIM

A.2.1 Modélisation d'un agent

Un agent est défini par la classe *Agent* et implémente l'interface *ModuleDeliberation* qui représente son *module de délibération* : la classe *Agent* contient une instance de la classe *Itineraire*, qui définit la structure d'un itinéraire, et une instance de la classe *Corps*, qui définit la représentation physique de l'agent dans l'environnement. Les ressources de navigation, qui composent les itinéraires, sont modélisées par la classe *Ressource*.

Les autres attributs de la classe *Agent* sont :

_position : position *assumée* de l'agent dans l'environnement. Cette position est mise à jour en temps réel en fonction des déplacements élémentaires générés par le moteur physique (voir algorithme 1).

_voisins : liste des voisins avec lesquels une collision est imminente. Cette liste est utilisée par l'agent pour le calcul des influences.

_vPref : vitesse désirée de l'agent déterminée à partir de l'itinéraire courant.

Les méthodes héritées de l'interface *ModuleDeliberation* sont :

majPos : récupère la position courante et la vitesse instantanée de l'agent dans l'environnement.

notifieEnv : notifie le déplacement de l'agent en temps réel, pour la maintenance des ressources, et réajuste son itinéraire en fonction des ressources parcourues. L'exécution de cette méthode nécessite une *communication* avec l'environnement.

calculeInfluence : génère une influence en fonction de l'itinéraire courant.

majItineraire : fait évoluer l'itinéraire courant de l'agent suivant les paramètres de l'algorithme tabou qui lui sont propres (voir section 4.4).

ajustItineraire : réajuste l'itinéraire courant en fonction des ressources parcourues.

appliqueInfluence : influence le corps de l'agent, représenté comme une instance de la classe *Corps*.

majVoisins : actualise *_voisins*.

Le corps fait partie de l'environnement et est sujet de la dynamique propre de l'environnement. Les attributs de la classe *Corps* sont :

_rayon : définit le rayon de l'agent (dans notre travail, nous considérons que l'enveloppe physique d'un agent a la forme d'un disque et que les déplacements se déroulent dans un plan). Le rayon est défini à l'instanciation de l'agent.

_vitesse, *_position* : définissent respectivement la vitesse instantanée et la position de l'agent en temps réel dans l'environnement. Ces attributs sont modifiés par le moteur physique uniquement (voir méthode *majPosVit* de la classe *Environnement*)

_influence, *_vitesseMaximale* : définissent respectivement l'influence et la vitesse maximale. L'influence est renseignée par l'agent uniquement — via la méthode *appliqueInfluence* — et la vitesse maximale est définie à l'instanciation de l'agent (il est envisageable que l'agent fasse évoluer sa vitesse maximale en cours de simulation). Rappelons que *_influence* représente le déplacement décidé après la prise en compte du voisinage immédiat. Il s'agit de la vitesse admissible la plus proche de *_vPref* (voir section 4.2.3). Elle est convertie en déplacement élémentaire, i.e vitesse instantanée, par le moteur physique. Le **rayon**, la **position** et la **vitesse instantanée** sont observables par les autres agents, tandis que l'**influence** et la **vitesse maximale** sont considérées comme des paramètres internes, non observables par les autres agents.

A.2.2 Modélisation de l'environnement

La classe *Environnement* définit la structure de l'environnement et implémente deux interfaces, *MoteurPhysique* et *ModuleTrafic*. Les principales méthodes implémentées par la classe *Environnement* sont :

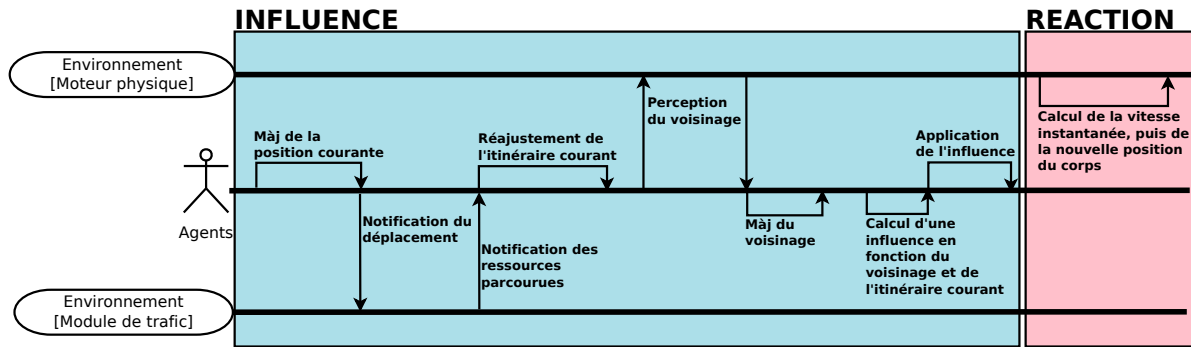
majPosVit : fait évoluer la position et la vitesse instantanée en temps réel en fonction des influences générées par les agents (héritée de *MoteurPhysique*).

majHist : historise les notifications des agents (héritée de *ModuleTrafic*).

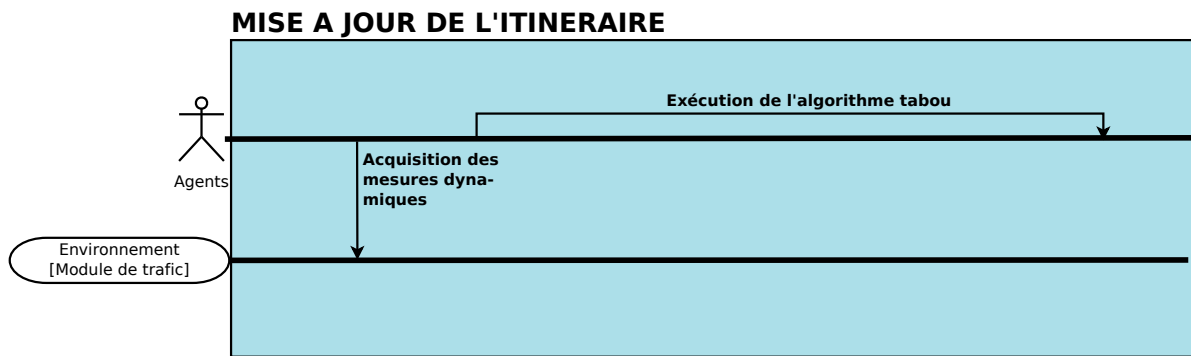
notifieAgent notifie l'agent au cours de son déplacement (pour le réajustement de son itinéraire) et enregistre les ressources parcourues pour l'historisation (héritée de *ModuleTrafic*). Cette méthode est déclenchée à la demande des agents (voir méthode *notifieDeplacement* de la classe *Agent*).

A.2.3 Utilisation de RVOLib

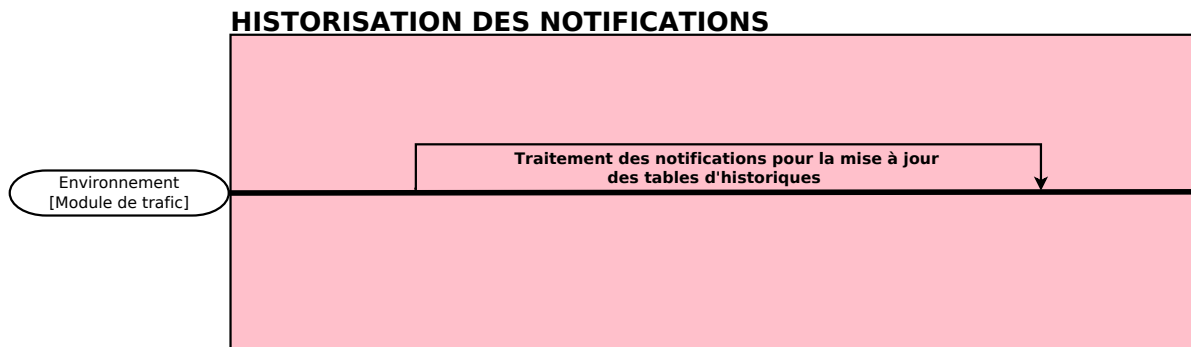
La figure A.3 rappelle le diagramme de séquence utilisé pour exécuter une simulation à partir de notre modèle. Nous pouvons distinguer 3 différentes pour l'exécution de la simulation. La *boucle* influence/réaction dans laquelle nous incluons la notification des déplacements et le réajustement de l'itinéraire en fonction des ressources parcourues (figure A.3(a)), l'historisation des notifications (figure A.3(c)), et la mise à jour dynamique des itinéraires (figure A.3(b)).



(a) Proc1 : Influence et réaction



(b) Proc2 : Recherche dynamique d'itinéraire



(c) Proc3 : Historisation des notifications

FIGURE A.3 – Diagrammes de séquence utilisés pour exécuter une simulation à partir du modèle MIM

Nous utilisons RVOLib pour mettre en œuvre la tâche *Proc2* schématisée par la figure A.3(b). Les agents ne mettent plus directement leur position à jour mais calculent une influence parmi les vitesses admissibles à chaque pas de simulation. C'est l'environnement qui réagit et génère une nouvelle vitesse instantanée et une nouvelle position.

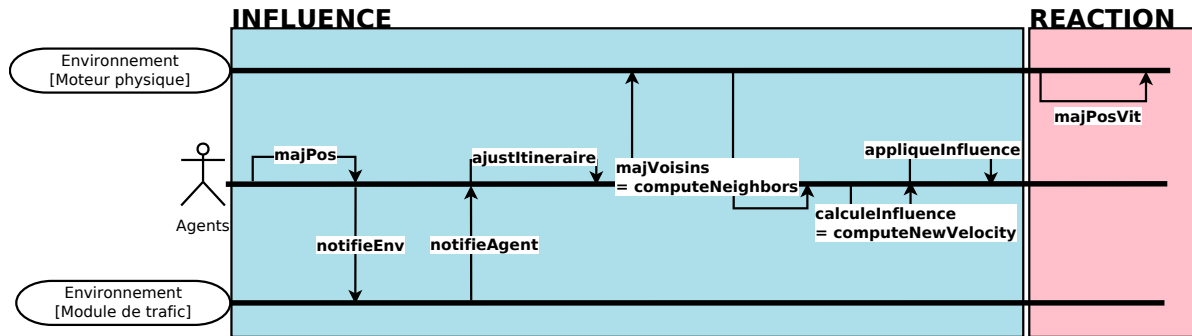


FIGURE A.4 – Diagramme de séquence de la boucle *Influence/Réaction* utilisé pour l'implémentation du modèle MIM

Sur la figure A.4, nous montrons les fonctionnalités de RVOLib que nous réutilisons. Il s'agit des fonctions : *computeNeighbors* (utilisée pour implémenter *majVoisins*), qui calcule les agents et les obstacles fixes avec lesquels une collision est imminente, et *computeNewVelocity* (utilisée pour implémenter *calculeInfluence*) qui calcule la vitesse admissible la plus proche de la vitesse désirée $_vPref$. Rappelons que l'avantage de cette séparation est que nous pouvons envisager un moteur physique beaucoup plus complexe — qui pourrait prendre en compte les chocs dans le calcul de la vitesse instantanée et de la nouvelle position. Nous avons cité quelques bibliothèques libres existantes permettant d'implémenter des moteurs physiques complets (voir section 4.2.3).

Bibliographie

- ABADI, F. H., MUHAMAD, T. A. et SALAMUDDIN, N. (2010). Energy Expenditure through Walking : Meta Analysis on Gender and Age. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 7(0):512–521.
- ANH, N. T. N., DANIEL, Z. J., DU, N. H., DROGOUL, A. et AN, V. D. (2012). A Hybrid macro-micro pedestrians evacuation model to speed up simulation in road networks. *In Advanced Agent Technology*, pages 371–383. Springer.
- ARKIN, R. C. (1989). Towards the Unification of Navigational Planning and Reactive Control. *In Working Notes of the AAAI Spring Symposium on Robot Navigation*, pages 1–5. Stanford University.
- AUBEL, A., BOULIC, R. et THALMANN, D. (2002). Animated Impostors for Real Time Display or Numerous Virtual Humans. *EPFL - Computer Graphics Lab*.
- BANDI, S. et THALMANN, D. (2000). Path finding for human motion in virtual environments. *Computational Geometry Theory and Applications*, 15(1-3):103–127.
- BLUE, V. J. et ADLER, J. L. (2000). Modeling Four Directional Pedestrian Movements. *Transportation Research Board*, (518).
- BLUE, V. J. et ADLER, J. L. (2001). Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B : Methodological*, 35(3):293–312.
- BRAUN, A., BODMANN, B. E. J. et MUSSE, S. R. (2005). Simulating virtual crowds in emergency situations. *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology VRST 05*, page 244.
- BROGAN, D. C. et JOHNSON, N. L. (2003). Realistic Human Walking Paths. *Proceedings 11th IEEE International Workshop on Program Comprehension*, pages 94–101.

- CAMPANO, S., de SEVIN, E., CORRUBLE, V. et SABOURET, N. (2012). An Architecture for Affective Behaviours Based on Conservation of Resource. *In Agents for Education, Games and Simulations*. Springer.
- CAMPANO, S., de SEVIN, E., CORRUBLE, V. et SABOURET, N. (2013). Evaluation of a Computational Model for Affective Behaviors. *In Twelfth International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2013)*.
- CASALI, D., COSTANTINI, G. et CAROTA, M. (2007). A tabu search based routing optimization algorithm for packet switching networks. *In Proceedings of the 11th Conference on Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Circuits*, pages 180–184. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS).
- CHAUVIN, S., LEVIEUX, G., DONNART, J.-Y. et NATKIN, S. (2014). An Out of Character Approach to Emergent Game Narratives. *In Foundations of Digital Games 2014*.
- COUMANS, E. (2008). *Bullet 2.73 Physics SDK Manual*.
- CUTTING, J. E. (1997). How the eye measures reality and virtual reality.
- CUTTING, J. E. et READINGER, W. O. (2002). Perceiving motion while moving : how pairwise nominal invariants make optical flow cohere. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 28(3):731–747.
- CUTTING, J. E., SPRINGER, K., BRAREN, P. A. et JOHNSON, S. H. (1992). Wayfinding on foot from information in retinal, not optical, flow. *Journal of experimental psychology. General*, 121(1):41–72.
- CUTTING, J. E., WANG, R. F., FLÜCKIGER, M. et BAUMBERGER, B. (1999). Human heading judgments and object-based motion information. *Vision research*, 39(6):1079–1105.
- DAAMEN, W. (2004). *Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities*. Thèse de doctorat, TU Delft.
- DAAMEN, W. et HOOGENDOORN, S. (2003). Experimental Research of Pedestrian Walking Behavior. *Transportation Research Record*, 1828(1):20–30.
- DAAMEN, W. et HOOGENDOORN, S. P. (2007). Flow-Density Relations for Pedestrian Traffic. *In* SCHADSCHNEIDER, A., PÖSCHEL, T., KÜHNE, R., AND MICHAEL SCHRECKENBERG et WOLF, D. E., éditeurs : *Traffic and Granular Flow 2005*, pages 315–322. Springer, Berlin.

-
- DAPPER, F., PRESTES, E. et NEDEL, L. P. (2007). Generating steering behaviors for virtual humanoids using bvp control. *Proc of Computer Graphics International RJ Brazil*, pages 105–114.
- DE BERG, M., CHEONG, O., VAN KREVELD, M. et OVERMARS, M. (2008). *Computational Geometry : Algorithms and Applications*, volume 17. Springer-Verlag.
- DIJKSTRA, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1):269–271.
- DROGOUL, A. et FERBER, J. (1994). Multi-agent simulation as a tool for studying emergent processes in societies. In GILBERT, N. et DORAN, J., éditeurs : *Simulating Society The Computer Simulation of Social Phenomena*, chapitre 6, pages 127–142. UCL Press.
- FERBER, J. et MÜLLER, J.-P. (1996). Influences and reaction : a model of situated multiagent systems. In *Proceedings of Second International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-96)*, pages 72–79.
- FERBER, J. et PERROT, J.-F. (1995). *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. IIA, Informatique, intelligence artificielle. InterEditions, Paris.
- FIORINI, P. et SHILLER, Z. (1993). Motion planning in dynamic environments using the relative velocity paradigm. *[1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- FIORINI, P. et SHILLER, Z. (1998). Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles. *The International Journal of Robotics Research*, 17(7):760–772.
- FRUIN, J. J. (1971). Pedestrian Planning and Design. *Elevator World Inc*, 77(4):556–561.
- FRUIN, J. J. (1993). The causes and prevention of crowd disasters. *Engineering for crowd safety*. Elsevier, New York, pages 1–10.
- FULGENZI, C., SPALANZANI, A. et LAUGIER, C. (2007). Dynamic Obstacle Avoidance in uncertain environment combining PVOs and Occupancy Grid. In *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, numéro April, pages 1610–1616. Ieee.
- GLOVER, F. et LAGUNA, M. (1997). Tabu Search. *Journal of computational biology a journal of computational molecular cell biology*, 16(12):1689–703.

- GOFFMAN, E. (1972). The Individual As A Unit. Relation in Public : Microstudies of the Public Order. *Allen Lane The Penguin Press*.
- GOLLEDGE, R. G. (1992). Place recognition and wayfinding : Making sense of space. *Geoforum*, 23(2):199–214.
- GOLLEDGE, R. G. (1995). 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.
- GOLLEDGE, R. G. (1997). Defining the Criteria Used in Path Selection. In ETTEMA, D. et TIMMERMANS, H., éditeurs : *Activity-Based Approaches to Travel Analysis*, chapitre 8, page 151. Pergamon.
- GUY, S. J., CHHUGANI, J., CURTIS, S., DUBEY, P., LIN, M. et MANOCHA, D. (2010a). PLEdestrians : A Least-Effort Approach to Crowd Simulation. *Computing*, pages 119–128.
- GUY, S. J., CHHUGANI, J., KIM, C., SATISH, N., LIN, M., MANOCHA, D. et DUBEY, P. (2009). ClearPath : Highly Parallel Collision Avoidance for Multi-Agent Simulation. In FELLNER, D. et SPENCER, S., éditeurs : *Computing*, volume 1, pages 177–187. ACM.
- GUY, S. J., LIN, M. C. et MANOCHA, D. (2010b). Modeling Collision Avoidance Behavior for Virtual Humans. *Contract*, pages 575–582.
- HANON, D., STRUGEON, G. et MANDIAU, R. (2005). A behaviour based decisional model using vote. *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*, 1.
- HARKOUKEN-SAIAH, K., SABOURET, N. et DONNART, J.-Y. (2012). Modélisation de l'information sémantique pour la simulation d'un environnement virtuel sémantique urbain. In *23rd Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC'2012)*, Paris, France.
- HARKOUKEN-SAIAH, K., SIMO KANMEUGNE, P., SABOURET, N. et BEYNIER, A. (2011). Simulations des déplacements en milieu urbain à l'aide d'un module sémantique. In *RJCIA*.
- HAYES, P. J. (1971). The frame problem and related problems in artificial intelligence. Rapport technique, Stanford University.

-
- HELBING, D. et JOHANSSON, A. (2009). Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics. *Media*, 16(4):6476–6495.
- HELBING, D. et MOLNAR, P. (1998). Social Force Model for Pedestrian Dynamics. *Physical Review E*, 51(5):4282–4286.
- HELBING, D., MOLNÁR, P., FARKAS, I. J. et BOLAY, K. (2001). Self-organizing pedestrian movement. *Environment and Planning B Planning and Design*, 28(3):361–383.
- HELBING, D. et MUKERJI, P. (2012). Crowd Disasters as Systemic Failures : Analysis of the Love Parade Disaster. *Disasters*.
- HENDERSON, L. F. (1974). On the fluid mechanics of human crowd motion. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 8(6):509–515.
- HOOGENDOORN, S. et DAAMEN, W. (2004). Self-organization in walker experiments. *Civil Engineering*, pages 121–132.
- HOOGENDOORN, S. P. (2005). Unified approach to estimating free speed distributions. *Transportation Research Part B : Methodological*, 39(8):709–727.
- HOOGENDOORN, S. P. et BOVY, P. H. L. (2004). Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B : Methodological*, 38(2): 169–190.
- HOOGENDOORN, S. P., BOVY, P. H. L. et DAAMEN, W. (2002). Microscopic pedestrian wayfinding and dynamics modelling. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pages 123–154 452.
- HOOGENDOORN, S. P., CAMPANELLA, M. C. et DAAMEN, W. (2011). Fundamental Diagrams for Pedestrian Networks. In PEACOCK, R. D., KULIGOWSKI, E. D. et AVERILL, J. D., éditeurs : *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, chapitre 23, pages 255–264. Springer US.
- HUGHES, R. L. (2002). A continuum theory for the flow of pedestrians.
- HUGHES, R. L. (2003). the Flow of Human Crowds. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35(1):169–182.
- HULL, C. L. (1943). Principles of behavior : An introduction to behavior theory.
- JELIĆ, A., APPERT-ROLLAND, C., LEMERCIER, S. et PETTRÉ, J. (2012). Properties of pedestrians walking in line – Fundamental diagrams. *Physical Review E*, 85(3):1–9.

- JENNINGS, N. R. (2000). On Agent-Based Software Engineering. *Artificial Intelligence*, 117(2):277–296.
- JHA, B., CUETO-FELGUEROSO, L. et JUANES, R. (2010). Fluid Mixing from Viscous Fingering. *Physical Review Letters*, 106(19):194502.
- KADANOFF, L. P. (1985). Simulating hydrodynamics : a pedestrian model. *Journal of statistical physics*, 39:267—283.
- KAMPHUIS, A. et OVERMARS, M. H. (2004). Finding paths for coherent groups using clearance. In *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH Eurographics symposium on Computer animation SCA 04*, pages 19–28. Eurographics Association.
- KAPADIA, M., SINGH, S., HEWLETT, W. et FALOUTSOS, P. (2009). Egocentric affordance fields in pedestrian steering. *Proceedings of the 2009 symposium on Interactive 3D graphics and games I3D 09*, 1(212):215.
- KAPADIA, M., WANG, M., REINMAN, G. et FALOUTSOS, P. (2011). Improved benchmarking for steering algorithms. In *Motion in Games*, pages 266–277. Springer.
- KARAMOUZAS, I. (2010). Simulating the Local Behaviour of Small Pedestrian Groups. *Robotics*, 1(212):183–190.
- KARAMOUZAS, I., BAKKER, J. et OVERMARS, M. H. (2009). Density constraints for crowd simulation.
- KLUGE, B. (2003). Recursive agent modeling with probabilistic velocity obstacles for mobile robot navigation among humans. *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS 2003 Cat No03CH37453*, 1(October):376–381.
- LAMARCHE, F. (2009). TopoPlan : a topological path planner for real time human navigation under floor and ceiling constraints. *Computer Graphics Forum*, 28(2):649–658.
- LATOMBE, J.-C. (1991). Robot Motion Planning.
- LAVALLE, S. M. (2006). Planning Algorithms. *Methods*, 2006(2):842.
- LE PENNEC, T. (1996). Ticking hour glasses : Experimental analysis of intermittent flow. *Phys. Rev. E*, 53(3):2257—2264.

-
- LOOMIS, J. M., DA SILVA, J. A., FUJITA, N. et FUKUSIMA, S. S. (1992). Visual space perception and visually directed action. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 18(4):906–921.
- LOSCOS, C., MARCHAL, D. et MEYER, A. (2003). Intuitive Crowd Behaviour in Dense Urban Environments using Local Laws. *In Proceedings of Theory and Practice of Computer Graphics 2003*, pages 122–129. IEEE Computer Society.
- METOYER, R. A. et HODGINS, J. K. (2003). Reactive pedestrian path following from examples.
- MICHEL, F. (2007). Le modele IRM4S, de l'utilisation des notions d'influence et de réaction pour la simulation de systemes multi-agents. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 21:757–779.
- MICHEL, F., GOUAICH, A., FERBER, J. et OTHERS (2003). Interaction Forte et Interaction Faible dans les Simulations Multi-Agents. *In Actes des Journées de Rochebrune sur les Systèmes Complexes*.
- MILCHTAICH, I. (1996). Congestion Games with Player-Specific Payoff Functions. *Games and Economic Behavior*, 13:111–124.
- MORVAN, G. et JOLLY, D. (2012). Multi-level agent-based modeling with the Influence Reaction principle. *CoRR*, abs/1204.0.
- MOSLAH, O., KLEE, M., GROLLEAU, A., GUITTENY, V., COUVET, S. et PHILIPP-FOLIGUET, S. (2008). Urban models texturing from un-calibrated photographs. *In Image and Vision Computing New Zealand, 2008. IVCNZ 2008. 23rd International Conference*, pages 1–6.
- MOULIN, B., CHAKER, W., PERRON, J., PELLETIER, P., HOGAN, J. et GBEI, E. (2003). MAGS project : Multi-agent GeoSimulation and crowd simulation. *In TIMPF, S., KUHN, W. et WORBOYS, M., éditeurs : Proceedings of the COSIT'03 Conference*, numéro September de Lecture Notes in Computer Science, pages 151–168. SPRINGER-VERLAG BERLIN.
- MOUSSAID, M., GARNIER, S., THERAULAZ, G. et HELBING, D. (2010). Collective Information Processing and Pattern Formation in swarms, flocks and crowds. *Topics in Cognitive Science*, 1(3):469–497.

- MOUSSAÏD, M., HELBING, D. et THERAULAZ, G. (2011). 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.
- MOUSSAÏD, M., PEROZO, N., GARNIER, S., HELBING, D. et THERAULAZ, G. (2010). The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics. *PloS one*, 5(4).
- NEWELL, K. M. et SPARROW, W. A. (1998). Metabolic energy expenditure and the regulation of movement economy. *Psychonomic Bulletin & Review*, 5(2):173–196.
- NIEUWENHUISEN, D., KAMPHUIS, A. et OVERMARS, M. H. (2007). High quality navigation in computer games. *Science of Computer Programming*, 67(1):91–104.
- NILSSON, N. J. (1980). *Principles of artificial intelligence*. Tioga publishing company Palo Alto, CA.
- NILSSON, N. J. (1991). Logic and artificial intelligence. *Artificial Intelligence*, 47(1-3):31–56.
- OLIVIER, A.-H., PETTRÉ, J., MARIN, A. et CRÉTUAL, A. (2012). Minimal predicted distance : A common metric for collision avoidance during pairwise interactions between walkers. *Gait & Posture*, 36(3):399–404.
- ONDREJ, J., PETTRÉ, J., OLIVIER, A.-H. et DONIKIAN, S. (2010). A synthetic-vision based steering approach for crowd simulation. *ACM Transactions on Graphics*, 29: 123 :1—123 :9.
- PARIS, S., PETTRÉ, J. et DONIKIAN, S. (2007). Pedestrian Reactive Navigation for Crowd Simulation : a Predictive Approach. *Computer Graphics Forum*, 26(3):665–674.
- PATIL, S., BERG, J. V. D., CURTIS, S., LIN, M. C. et MANOCHA, D. (2010). Directing crowd simulations using navigation fields. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(2):244–254.
- PELECHANO, N., ALLBECK, J. M. et BADLER, N. I. (2007). Controlling individual agents in high-density crowd simulation. In METAXAS, D. et POPOVIC, J., éditeurs : *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, SCA '07, pages 99—108. Eurographics Association.

-
- PETTRE, J., LAUMOND, J. P. et THALMANN, D. (2005). A navigation graph for real-time crowd animation on multilayered and uneven terrain. *First International Workshop on Crowd Simulation*, 47(2):81—90.
- PETTRÉ, J., ONDREJ, J., OLIVIER, A.-h., CRETUAL, A. et DONIKIAN, S. (2009). Experiment-based modeling, simulation and validation of interactions between virtual walkers. In *Symposium on Computer Animation - SCA*, pages 189–198. ACM Press.
- PORTZ, A. et SEYFRIED, A. (2009). Modeling Stop-and-Go Waves in Pedestrian Dynamics. In *Parallel Processing and Applied Mathematics*, pages 561–568.
- POULET, C., CORRUBLE, V. et EL FALLAH SEGHROUCHNI, A. (2012). Travailler en équipe : le choix social appliqué au problème de la patrouille multi-agents . In *Actes des journées francophones sur les systèmes multi-agents (JFSMA '12)*.
- REESE, B. et STOUT, B. (1999). Finding A Pathfinder. In *Papers from the 1999 AAAI Spring Symposium on Artificial Intelligence and Computer Games*, pages 69–72.
- REYNAUD, Q., de SEVIN, E., DONNART, J.-Y. et CORRUBLE, V. (2012). A cognitive module in a decision-making architecture for agents in urban simulations. In *Workshop on Cognitive Agents in Virtual Environments (CAVE) Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS'12)*, Valencia, Spain.
- REYNOLDS, C. (2000). Interaction with Groups of Autonomous Characters.
- ROSENTHAL, R. W. (1973). A class of games possessing pure-strategy Nash equilibria. *International Journal of Game Theory*, 2:65–67.
- ROUGHGARDEN, T. (2002). *Selfish routing*. Thèse de doctorat, Cornell University.
- SABOIA, P. et GOLDENSTEIN, S. (2012). Crowd simulation : applying mobile grids to the social force model. *The Visual Computer*, 28(10):1039–1048.
- SAMET, H. (1988). An overview of quadtrees, octrees, and related hierarchical data structures. *Theoretical Foundations of Computer Graphics and CAD*, 40(1):51–68.
- SCHADSCHNEIDER, A., KLINGSCH, W., KLUEPFEL, H., KRETZ, T., ROGSCH, C. et SEYFRIED, A. (2008). Evacuation Dynamics : Empirical Results, Modeling and Applications. *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, pages 3142–3176.

- SEYFRIED, A., STEFFEN, B., KLINGSCH, W. et BOLTES, M. (2005). The fundamental diagram of pedestrian movement revisited. *Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment*, 10:10002.
- SHAO, W. et TERZOPOULOS, D. (2005). Environmental Modeling for Autonomous Virtual Pedestrians. *New York*, 114(724):735–742.
- SHAO, W. et TERZOPOULOS, D. (2007). Autonomous pedestrians. *Graphical Models*, 69(5-6):246–274.
- SHILLER, Z., LARGE, F. et SEKHAVAT, S. (2001). Motion planning in dynamic environments : obstacles moving along arbitrary trajectories. *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*, 4.
- SHOHAM, Y. et LEYTON-BROWN, K. (2009). Multiagent Systems : Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations. *ReVision*, 54(1-4):513 p.
- SIMO KANMEUGNE, P. et BEYNIER, A. (2014). Simulating Autonomous Pedestrians Navigation : A Generic Multi-Agent Model to Couple Individual and Collective Dynamics. *In Eighth International Workshop on Agents in Traffic and Transportation (AAMAS 2014)*, Paris, France.
- SIMO KANMEUGNE, P., BEYNIER, A. et DONNART, J.-Y. (2013). Modèle microscopique à influence macroscopique pour la simulation des déplacements de piétons autonomes en temps réel. *In JFSMA*.
- SIMONIN, O., LANOIX, A., SCHEUER, A. et CHARPILLET, F. (2011). Specifying in B the Influence/Reaction Model to Study Situated MAS : Application to vehicles platooning. *In V2CS : First International workshop on Verification and Validation of multi-agent models for complex systems*, page 15 pages, France.
- SINGH, B. S., KAPADIA, M., FALOUTSOS, P. et REINMAN, G. (2009). SteerBench : a benchmark suite for evaluating steering behaviors. *Computer Animation And Virtual Worlds*, 20(February):533–548.
- SPARROW, W. A. (1983). The efficiency of skilled performance. *Journal of motor behavior*, 15(3):237–261.
- STARON, L., LAGRÉE, P.-Y. et POPINET, S. (2012). The granular silo as a continuum plastic flow : The hour-glass vs the clepsydra. *Physics of Fluids*, 24(10):103301.

-
- STILL, G. K. (2000). *Crowd dynamics*. Thèse de doctorat, University of Warwick.
- STRATULAT, T., FERBER, J. et TRANIER, J. (2009). MASQ : towards an integral approach to interaction. *Mind*, 2:813–820.
- STYLIANOU, S., FYRILLAS, M. M. et CHRYSANTHOU, Y. (2004). Scalable Pedestrian Simulation for Virtual Cities. *In Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. ACM.
- SUD, A., GAYLE, R., ANDERSEN, E., GUY, S., LIN, M. et MANOCHA, D. (2008). Real-time navigation of independent agents using adaptive roadmaps. *ACM SIGGRAPH 2008 classes on - SIGGRAPH '08*, 1(212):1.
- SUN, H. C. et METAXAS, D. N. (2001). Automating gait generation. *In Proceedings of the conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '01)*, numéro August, pages 261–270. ACM Press.
- TECCHIA, F., LOSCOS, C. et CHRYSANTOU, S. Y. (2002). Visualizing Crowd In Real-Time. *COMPUTER GRAPHICS Forum*.
- TECCHIA, F., LOSCOS, C., CONROY-DALTON, R. et CHRYSANTHOU, Y. (2001). Agent Behaviour Simulator (ABS) : a platform for urban behaviour development. *In GTEC'2001*. Citeseer.
- TEKNOMO, K. (2002). *Microscopic pedestrian flow characteristics : Development of an image processing data collection and simulation model*. Thèse de doctorat, Tohoku University, Japan.
- THALMANN, D., GRILLON, H., MAIM, J. et YERSIN, B. (2009). Challenges in Crowd Simulation. *In International Conference on CyberWorlds*, pages 1–12. Ieee.
- THALMANN, D. et ULICNY, B. (2002). Crowd Simulation for Virtual Heritage. *Computer Graphics Lab (LIG)*.
- TREUILLE, A., COOPER, S. et POPOVIĆ, Z. (2006). Continuum crowds. *ACM Transactions on Graphics*, 25(3):1160.
- TSITSIKLIS, J. N. (1995). Efficient algorithms for globally optimal trajectories. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(9):1528–1538.
- VAN DEN BERG, J., GUY, S., LIN, M. et MANOCHA, D. (2010). Reciprocal n-body collision avoidance. *Robotics Research*, pages 1–16.

- VAN DEN BERG, J. et MANOCHA, D. (2008). Reciprocal Velocity Obstacles for real-time multi-agent navigation. *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1928–1935.
- VIRKLER, M. R. et ELAYADATH, S. (1994). Pedestrian Density Characteristics and Shock-waves. In AKCELIK, R., éditeur : *Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity*, volume 2, pages 671–684.
- VISHTON, P. M. et CUTTING, J. E. (1995). Wayfinding, displacements, and mental maps : velocity fields are not typically used to determine one’s aimpoint. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 21(5):978–995.
- VISHTON, P. M., CUTTING, J. E. et BRAREN, P. A. (1995). How we avoid collisions with stationary and moving objects. *Psychological Review*, 102(4):627–651.
- VON NEUMANN, J. et MORGENSTERN, O. (1944). Theory of Games and Economic Behavior. *Princeton University Press*, 2:625.
- WEYNS, D., OMICINI, A. et ODELL, J. (2006). Environment as a first class abstraction in multiagent systems. *Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, 14(1):5–30.
- WHITTLE, M. W. (2007). *An Introduction to Gait Analysis*. Butterworth-Heinemann.
- WOOLDRIDGE, M. (2002). *Introduction to Multiagent Systems*, volume 30. John Wiley & Sons, Inc.
- YERSIN, B., MA, J., CIECHOMSKI, P. D. H. et THALMANN, D. (2005). Steering a Virtual Crowd Based on a Semantically Augmented Navigation Graph. *Variety*.
- YERSIN, B., MAÏM, J., MORINI, F. et THALMANN, D. (2008). Real-time crowd motion planning. *The Visual Computer*, 24(10):859–870.
- ZHANG, J., KLINGSCH, W., SCHADSCHNEIDER, A. et SEYFRIED, A. (2012). Ordering in bidirectional pedestrian flows and its influence on the fundamental diagram. *Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment*, 2012(02):P02002.
- ZHANG, Q., HAN, B. et LI, D. (2008). Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijing metro stations. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 16(5):635–649.

ZHOU, S., CHEN, D., CAI, W., LUO, L., LOW, M. Y. H., TIAN, F., TAY, V. S.-H., ONG, D. W. S. et HAMILTON, B. D. (2010). Crowd modeling and simulation technologies. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*, 20(4):20.

ZIPF, G. K. (1949). *Human behavior and the principle of least effort : An introduction to human ecology*, volume 47. Addison-Wesley Press.

ZUKERMAN, M. (2008). Introduction to Queueing Theory and Stochastic Teletraffic Models. *Networks*, 2008:1–218.