

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Cheikh Larbi Tbessi –Tébessa-**  
**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**  
**Département Informatique**

Ecole doctorale Sciences et Technologies de l'information et de la communication,

N° D'ORDRE : .....

SERIE : .....



**MEMOIRE DE MAGISTER**  
**EN INFORMATIQUE**

Option : Ingénierie des systèmes informatiques

**Peuplement automatisé dans un environnement urbain**

**Présenté par : Saloua Difallah**

**Rapporteur : Dr. Cherif Foudil**

Soutenu le ...../2010

**Devant le Jury:**

Djedi Noureddine	Professeur, Université de Biskra	Président
Babahenini Med Chaouki	Maître de Conférences A, Université de Biskra	Examineur
Moussaoui Abdelwahab	Maître de Conférences A, Université de Setif	Examineur
Laouar Ridda	Maître de Conférences A, Université de Tébessa	Examineur
Cherif Foudil	Maître de Conférences A, Université de Biskra	Examineur

# Remerciements

*"Louange à dieu, le seul et unique"*

*Qui m'avoit donné le courage, la puissance et la patience pour terminer ce modeste travail.*

*Je tiens tout d'abord à remercier vivement mon encadreur Dr CHERIF Foudil, qui m'a apporté un appui constant tout au long de ce travail, et de me faire profiter de son savoir, ainsi de ses conseils, et pour toute l'aide, les remarques constructives qui m'a permet d'améliorer ce travail, je tiens à souligner sa disponibilité et sa gentillesse.*

*Un grand remerciement aux membres de mon jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger mon travail.*

*Je remercie spécialement mes chers parents pour leur encouragements durant toute ma vie, pour tous ce qu'ils ont faits pour j'arrive à ce jour là et que Dieu les protège. Je remercie, ma famille dans tout son ensemble pour l'aide et le soutien qu'on m'a donné.*

*Je tiens aussi à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué scientifiquement et humainement à la réalisation de ce travail.*

*A tous merci*

---

# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre 1: L'environnement urbain</b>	<b>04</b>
1. Introduction .....	04
2. Représentation de l'environnement et recherche de chemin .....	05
2.1 Représentation des parties statiques de l'environnement .....	05
2.1.1 Décomposition en cellules .....	05
2.1.2 Cartes de cheminements .....	08
2.1.3 Champs de potentiel .....	10
2.2 Représentation des zones de navigation.....	11
2.3 Planification de chemin.....	12
3. Définition générale d'un environnement virtuel.....	14
4. Les sources et les modèles d'une ville virtuelle.....	15
4.1 Modeleurs géométriques 3D .....	16
4.2 Modeleurs routiers .....	16
5. Subdivision de l'environnement .....	17
5.1 La représentation topologique .....	17
5.1.1 Subdivision spatiale informée.....	17
5.1.2 L'abstraction topologique .....	18
5.1.3 Les nœuds conceptuels .....	21
5.2 Un environnement informé .....	22
5.2.1 Informations statiques .....	22
5.2.2 Informations dynamiques .....	22

## *Table des matières*

---

6. Environnement informé dans un contexte urbain.....	23
6.1 Introduction .....	23
6.2 CITY .....	25
6.3 CROWD .....	28
6.4 Analyse.....	32
7. Conclusion .....	33
<b>Chapitre 2: Animation comportementale des piétons</b>	<b>34</b>
1. Introduction.....	34
2. L'animation comportementale: contexte et définition .....	34
3. L'humanoïde virtuel autonome.....	36
4. Animation comportementale des humanoïdes .....	37
4.1 Animation des humanoïdes .....	37
4.2 L'entité et son environnement.....	37
4.3 Principe de décision .....	39
4.3.1 Modélisation du comportement réactif.....	41
4.3.2 Modélisation du comportement cognitif .....	46
4.4 Perception.....	47
4.4.1 Les nœuds de perception .....	48
4.4.2 Interprétation des données et connaissance .....	49
5. Comportement du piéton.....	51
5.1 Le suivie de voie .....	51
5.2 La traversée de rue .....	52
5.2.1 Étape de la traversée.....	53
5.2.2 Traversée et risque .....	55
5.2.3 Traversée en groupe .....	56
6. Comportement de foules .....	57

---

## *Table des matières*

---

7. Conclusion.....	58
<b>Chapitre 3: Navigation d'humanoïdes</b>	<b>59</b>
1. Introduction.....	59
2. Le comportement de navigation piétonnier .....	60
2.1 Représentation mentale de l'environnement de navigation.....	60
2.2 Processus mentaux de navigation .....	63
3. Les bases de l'environnement.....	63
3.1 Règle de navigation.....	63
4. Détection de voisinage et évitement .....	63
4.1 Connaissance de l'entourage.....	64
4.2 Adaptation pour l'évitement .....	64
5. Modèles de simulation de comportement de navigation .....	65
5.1 Résultats d'observation sur le comportement piétonnier .....	66
5.2 Modèle à base de particules.....	67
5.3 Le modèle à base de règles.....	69
5.4 Modèle prédictif.....	70
5.5 Environnements urbain informés.....	72
6. Conclusion.....	73
<b>Chapitre 4: Contributions</b>	<b>74</b>
1. Introduction.....	74
2. Représentation de l'environnement.....	75
2.1 Reconstruction 3D par traitement d'images .....	75
2.2 Subdivision de l'environnement.....	75
3. Structure de notre système .....	78
3.1 L'interface graphique .....	78
3.2 Modélisation de la scène .....	80

---

## *Table des matières*

---

3.3 Initialisation de la scène .....	82
4. Recherche du chemin.....	84
5. L'animation.....	85
5.1 Perception.....	85
5.2 Réaction.....	87
5.3 Action.....	88
6. Conclusion.....	89
<b>Chapitre 5: Validation et Résultats</b>	<b>90</b>
1. Introduction .....	90
2. Le langage de programmation et la bibliothèque graphique utilisée.....	91
3. Modélisation de la scène .....	91
3.1 L'environnement .....	92
3.2 Le piéton.....	92
4. L'interface de notre système .....	93
5. Modélisation des comportements .....	95
5.1 Recherche du chemin .....	95
5.2 Comportement d'évitement de collision.....	97
5.3 Comportement d'évitement d'obstacle .....	98
5.4 Comportement attendre feu rouge .....	98
6. Analyse des résultats.....	99
6.1 L'évitement de collision .....	99
6.2 L'évitement d'obstacle.....	101
6. Conclusion.....	102
<b>Conclusion générale</b>	<b>103</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>105</b>

---

# Table des figures

## Chapitre 1: L'environnement urbain

<b>Figure 1.1:</b> La triangulation de Delaunay d'un environnement.....	06
<b>Figure 1.2:</b> Exemple de grilles régulières98 .....	07
<b>Figure 1.3:</b> Exemple de carte de cheminement .....	08
<b>Figure 1.4:</b> Graphe de visibilité.....	09
<b>Figure 1.5:</b> Carte de champs de potentiels.....	10
<b>Figure 1.6:</b> L'algorithme de Dijkstra.....	13
<b>Figure 1.7:</b> Sources et modèles pour une ville virtuelle .....	15
<b>Figure 1.8:</b> Subdivision spatiale préalable à 'abstraction.....	17
<b>Figure 1.9:</b> Graphe topologique extrait de la subdivision.....	18
<b>Figure 1.10:</b> Aléas géométriques se répercutant sur la subdivision .....	19
<b>Figure 1.11:</b> Déroulement de la première abstraction sur le cas de test .....	21
<b>Figure 1.12:</b> Représentation de l'Architecture du système.....	25
<b>Figure 1.13:</b> Un environnement informé .....	26
<b>Figure 1.14:</b> Circulation de piétons en environnement virtuel urbain.....	27
<b>Figure 1.15:</b> Architecture d'un système CROWD .....	29
<b>Figure 1.16:</b> Les points Internés et but pour conduire la foule .....	31
<b>Figure 1.17:</b> Différents groupes qui entraînent dans un stade .....	32
<b>Figure 1.18:</b> Simulation d'une rame de métro à une heure de pointe .....	33
<b>Chapitre 2: Animation comportementale des piétons</b>	
<b>Figure 2.1:</b> Pyramide de l'animation d'un humanoïde de synthèse .....	36
<b>Figure 2.2:</b> Boucle de rétroaction.....	39

---

## *Table des figures*

---

<b>Figure 2.3:</b> Pyramide décisionnel.....	40
<b>Figure 2.4:</b> Les réseaux SAN.....	42
<b>Figure 2.5:</b> Exemple d'arbre de décision .....	44
<b>Figure 2.6:</b> Structure du modèle comportementale .....	50
<b>Figure 2.7:</b> Définition d'une voie.....	51
<b>Figure 2.8:</b> Etapes de la traversée de rue.....	53
<b>Figure 2.9:</b> La traversée (configurations spatiales).....	54
<b>Figure 2.10:</b> Répartition des taches d'observation avant la traversée de chaussée.....	56
<b>Chapitre 3: Navigation d'humanoïdes</b>	
<b>Figure 3.1:</b> Aire de Goffman(en vert).....	62
<b>Figure 3.2:</b> Quatre types de collision.....	64
<b>Figure 3.3:</b> Phénomène d'agglutination de particules.....	68
<b>Figure 3.4:</b> Règles comportementales du modèle Flocks of Boids.....	69
<b>Figure 3.5:</b> Modèle prédictif de navigation de Feurtey.....	70
<b>Chapitre 4: Contributions</b>	
<b>Figure 4.1:</b> Description géométrique de l'environnement .....	76
<b>Figure 4.2:</b> Graphe de zones .....	77
<b>Figure 4.3:</b> Organisation des menus de l'interface graphique.....	79
<b>Figure 4.4:</b> La définition des modèles d'objets .....	82
<b>Figure 4.5:</b> Caractéristiques d'un piéton.....	83
<b>Figure 4.6:</b> Modèle de piéton synthétique .....	84
<b>Figure 4.7:</b> Boucle d'animation comportementale .....	85
<b>Figure 4.8:</b> Module Perception.....	86
<b>Figure 4.9:</b> Les différentes zones de l'environnement .....	87
<b>Figure 4.10:</b> Réaction .....	87

---



## *Table des figures*

---

### **Chapitre 5: Validation et Résultats**

<b>Figure 5.1:</b> Le graphe de zone.....	92
<b>Figure 5.2:</b> Représentation d'un environnement vide.....	93
<b>Figure 5.3:</b> Construction des obstacles et des piétons .....	94
<b>Figure 5.4:</b> Un ensemble d'individus qui circulent dans une scène.....	94
<b>Figure 5.5:</b> Le comportement de processus d'évitement de collision entre 2 agents .....	100
<b>Figure 5.6:</b> Le comportement de processus d'évitement de collision entre les véhicules et les individus .....	101
<b>Figure 5.7:</b> Le comportement de processus d'évitement d'obstacle .....	102

---

# *Introduction générale*

Les environnements virtuels et les techniques de synthèse d'images sont de plus en plus médiatisés et utilisées au cinéma et dans la publicité. Le succès et les progrès des jeux vidéo rendent ces techniques accessibles à tous. Dans le cadre particulier de la modélisation de villes virtuelles, les applications sont très nombreuses. Un environnement virtuel urbain peut servir à valoriser un projet architectural ou à étudier la sécurité urbaine.

Lorsqu'il s'agit de peupler des environnements urbains, plusieurs caractéristiques sont à prendre en compte. D'une part, l'environnement possède une certaine sémantique (notion de trottoirs, de places, de rues, de passages piétons, de commerces, de feux de circulation ...), ce qui influe grandement sur le comportement piétonnier. D'autre part, une ville est peuplée par plusieurs milliers de personnes, cela pose un certain nombre de problèmes liés au passage à l'échelle des algorithmes de simulation. L'objectif de ce travail est double, d'une part, il s'agit de travailler sur les techniques d'information de l'environnement (informations sémantiques et comportementales) ainsi que leur extraction automatisée lors du traitement des bases de données 3D. D'autre part, il s'agit de proposer un modèle comportemental permettant de simuler le comportement piétonnier au sein de villes virtuelles en prenant en compte les différentes informations et leur influence sur le comportement.

Nous allons ici nous intéresser au domaine de la simulation d'agents autonomes au sein d'environnements urbains. Ces environnements 3D sont apparus dans un premier temps dépourvus d'entités mobiles et purement géométriques. Des personnages virtuels y ont, par la suite, été ajoutés, créant ainsi une pseudo-vie au sein même de ces environnements. Ces personnages n'étaient qu'animation, ils suivaient une trajectoire déterminée au préalable par leurs créateurs respectifs. Au fur et à mesure, ces personnages se sont dotés d'une certaine autonomie, ils étaient désormais capables d'analyser brièvement le monde extérieur afin de choisir la meilleure stratégie à adopter.

Dans ce type d'application, nous avons affaire parfois à des simulations de foules ayant un comportement commun, mais le plus souvent les personnages ont chacun une « vie » propre. Le but principal de cette simulation est de générer facilement les mouvements, les actions et les

comportements d'un grand nombre d'individus. Il existe plusieurs types d'applications de simulation de foule. Parmi elles, nous pouvons citer le peuplement d'environnement virtuel, en assurant à l'animateur un moyen facile de programmer des foules décrire les mouvements de foule pour étudier les flux de personnes durant une simulation (par exemple, situation de panique dans un bâtiment), et donner de l'intelligence et de l'autonomie aux foules pour obtenir des agents automatiquement animés. Dans tous ces domaines, la simulation de la foule est faite selon deux approches, l'approche macroscopique et l'approche microscopique.

Une animation comportementale est constituée d'acteurs autonomes (conducteur de voiture ou de camion, piéton, cycliste) évoluant dans un environnement virtuel (la ville), chaque personnage doit posséder un ensemble de composants lui permettant de jouer son rôle sans problème. Parmi ces composants se trouvent bien sûr un système de perception, de décision et d'action. La perception de l'environnement doit induire un comportement crédible: elle doit donc permettre au personnage de « comprendre » le sens des objets et des interactions entre objets qu'il détecte dans un environnement contenant les informations nécessaires au fonctionnement des modèles perceptifs et décisionnels des entités.

La navigation à l'intérieur des environnements complexes a beaucoup d'intérêt car elle constitue une grande partie du comportement d'agent. Avec l'augmentation de la puissance informatique des ordinateurs et des cartes de graphique, les environnements virtuels deviennent plus réalistes mais également plus grand et plus complexe. Comme les environnements deviennent plus grands, pour qu'ils semblent peuplés, la simulation d'un grand nombre de piétons est nécessaire. Cette simulation exige l'extraction des informations topologiques à partir de l'environnement afin de permettre à des agents de diriger et projeter leur chemin au besoin.

Dans ce mémoire nous avons simulé le comportement d'un ensemble de piétons dans un environnement urbain. Cet environnement est construit à partir de la scène géométrique 3D. Avant de réaliser la conception et l'implémentation de ce système, nous avons présenté l'étude et la modélisation du comportement humain, ainsi que la modélisation de l'environnement de navigation.

### **Objectifs**

Un des objectifs de l'analyse piétonnière est d'évaluer les effets de la politique proposée sur les équipements piétonniers avant son exécution. L'exécution d'une politique sans analyse piétonnière pourrait mener à une épreuve et à une erreur très coûteuse due à la valeur

d'exécution. Pour une conception plus efficace et plus sûre des équipements publics, il est important de pouvoir estimer le comportement de la foule, pour prévoir les itinéraires fortement utilisés ou les débits de pointe.

Notre objectif est d'une part l'introduction de quelques notions sur de différents thèmes : animation comportementale, une étude du comportement piétonnier, une vue d'ensemble sur les environnements urbains. D'autre part la construction d'un outil de simulation des piétons dans un environnement urbain, en focalisant sur les caractéristiques des humanoïdes : autonomie, capacité de décision, réaction aux évènements provenant de l'environnement.

### **Organisation du document**

Ce document est organisé en deux parties. La première partie est un développement de l'état de l'art sur tous les aspects qui entrent dans le domaine de l'animation comportementale et les environnements urbains et se décompose en trois chapitres:

- ✓ Le premier chapitre présente les différentes approches de représentation et de décomposition de l'espace.
- ✓ Le second chapitre on a définit les modélisations des comportements réactif et cognitif du modèle décisionnel, une brève définition de l'animation comportementale, on a présenté aussi les deux comportements les plus observés des piétons: la traverser de la rue et la suivie de voie.
- ✓ Le troisième chapitre présent la simulation de comportement de navigation réactive de piéton, les algorithmes de planification et le processus d'évitement de collision sont traités.

La deuxième partie contient les différentes étapes pour la construction de l'outil logiciel en partant de la contribution, la validation allant aux résultats.

# *Chapitre 1*

## *L'environnement urbain*

### **1. Introduction**

Il existe peu de travaux sur l'animation comportementale en environnement urbain et par conséquent peu de modèles urbains sont proposés dans ce domaine. Par contre, il existe d'autres domaines où les applications fondées sur des modèles urbains sont nombreuses. Par exemple, dans le cadre de projets de reconstitutions historiques, les modèles géométriques des bâtiments en 3 dimensions atteignent un très bon niveau de réalisme. Un autre exemple est la simulation de conduite où la modélisation du réseau routier fait l'objet de beaucoup d'attention.

Avec tels humains virtuels, il devient par exemple possible d'offrir une aide dans la prise de décision au sujet d'infrastructures urbaines. Afin de créer des simulations plus réalistes, l'environnement doit intégrer plusieurs notions sémantiques au sujet des zones spécifiques telles que « un trottoir est un espace consacré au mouvement des piétons ».

En effet, l'environnement virtuel est au centre de notre problématique. Il se doit d'être aussi proche de la réalité que possible, il va intégrer l'ensemble des informations nécessaires à la prise de décision de nos agents autonomes, que ce soit la géométrie et la topologie des lieux, ou encore l'emplacement des différents équipements. L'environnement va de plus fournir un accès aisé et rapide à un ensemble de données, tels que les flux de personnes ou la caractérisation des espaces visibles

Le mouvement des acteurs à l'intérieur d'un environnement virtuel a besoin d'une grande quantité d'informations à savoir : informations sur l'environnement (objet statique) et mécanisme de navigation dans l'environnement (évitement des obstacles, chemin plausible entre deux points de déplacement avec coût minimum d'énergétique et plus courte distance), pour assurer ces besoins, dans ce chapitre on étudie la description topologique permettant de représenter et d'organiser l'environnement de simulation.

---

## 2. Représentation de l'environnement et recherche de chemin

L'environnement dans lequel les entités évoluent est représenté par une géométrie permet de traduire la structure de l'environnement et donc les contraintes imposées lors de la navigation, cette géométrie représente les obstacles sous la forme de polygones en 2d et sous la forme de polyèdre en 3d. Cette hypothèse sert de base à un certain nombre de méthodes de représentation de l'espace et s'avère être corrélée avec les méthodes de modélisation d'environnement, plusieurs méthodes consistent à discrétiser l'espace de manière à identifier les zones dans lesquelles l'entité peut naviguer. Cette discrétisation peut ensuite être utilisée pour représenter la topologie des lieux au travers de la notion d'accessibilité entre zones. Cette propriété s'avère nécessaire pour la recherche d'un chemin entre deux points [Lam03].

En effet, disposant de bases de données 3D de l'environnement, le besoin d'une représentation adéquate pour la détection des obstacles et la planification de chemin est primordial. Il est également important de pouvoir attacher une sémantique à cet environnement, permettant par exemple d'adapter le comportement au fait que l'humanoïde soit sur un trottoir ou sur un passage piéton [Avr08].

### 2.1 Représentation des parties statiques de l'environnement

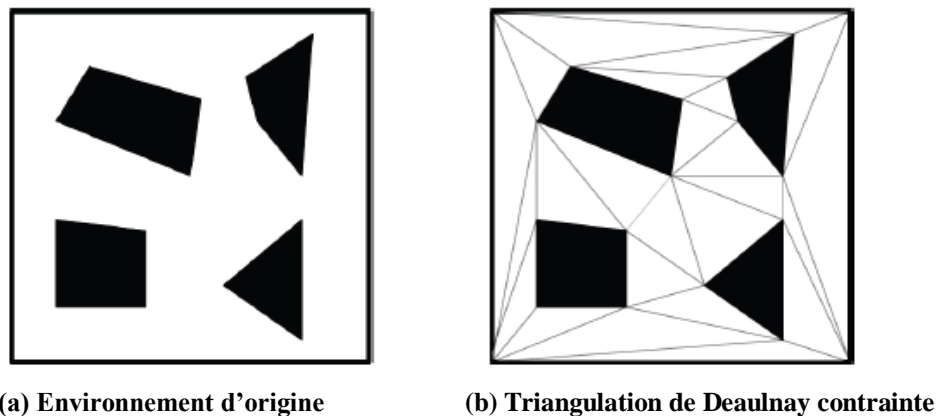
Afin de naviguer au sein des environnements virtuels, les humanoïdes doivent pouvoir planifier leur chemin afin d'optimiser leurs déplacements. Or ce type d'environnement, généralement représenté à l'aide de bases de données 3D, n'est pas adapté aux calculs de navigation des humanoïdes. Toutes les informations géométriques doivent donc être organisées pour faciliter ces calculs. Il existe plusieurs modèles permettant de représenter l'espace libre de l'environnement afin d'y naviguer [Avr08].

#### 2.1.1. Décomposition en cellules

Cette classe de méthode de discrétisation cherche à extraire une carte topologique de l'environnement en décomposant l'espace en cellules représentant des nœuds topologique. Une fois cette décomposition calculée, un graphe topologique peut être extrait, chaque nœud représente une cellule alors que chaque arc représente une relation de connexité et d'accessibilité entre deux cellules [Lam03].

### ✓ La triangulation de Delaunay

La triangulation de Delaunay [BY98] crée un ensemble de triangles en réunissant des points fournis en entrée. L'algorithme d'unification respecte pour contrainte que le cercle circonscrit à un triangle ne contienne aucun autre point que les trois sommets qui le composent. Une conséquence de cette propriété est que l'angle minimum d'un triangle produit est maximisé. Cette triangulation permet d'obtenir une représentation exacte de l'environnement en 2D. (Figure1.1) [Avr08].



**Figure 1.1:** La triangulation de Delaunay d'un environnement

La propriété la plus intéressante de cette triangulation est que chaque point  $y$  est relié à son plus proche voisin par l'arête d'un triangle. Ainsi, cette triangulation peut être utilisée pour représenter l'espace navigable, les points d'entrée étant issus des obstacles [Par07].

F.Lamarche propose une version filtrée de cette triangulation [LD04] permettant de choisir une augmentation ou une diminution du nombre de triangles.

### ✓ Grille

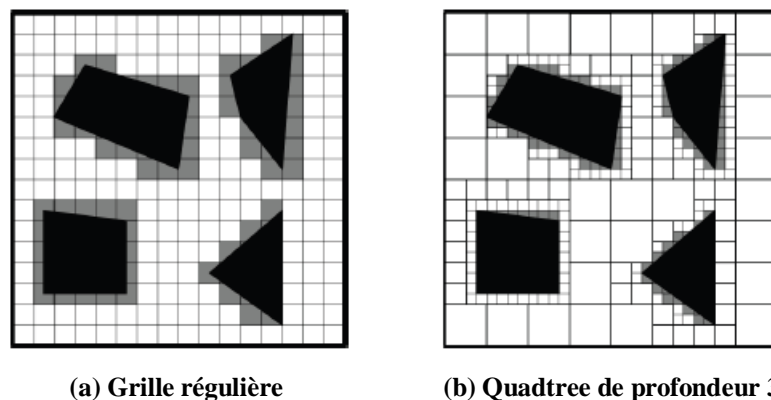
La méthode de décomposition en grille uniforme se base sur la notion de cellules carrées en deux dimensions et cubiques en trois dimensions [Lam03]. Elle permet donc d'obtenir une représentation approximative de l'environnement en 2D ou en 3D [Avr08] (Figure1.2) Le principe est donc de quadriller l'espace, de manière uniforme, avec ces cellules. Les cellules sont alors vides si elles appartiennent à la zone de navigation, partiellement obstruées si elles contiennent une partie d'un obstacle et obstruées si elles sont incluses à l'intérieur d'un obstacle [Par07].

L'algorithme de construction :

- ✓ Va commencer par paver l'environnement avec les cases les moins précises,
- ✓ puis découper récursivement les cases partiellement obstruées, en quatre parties pour la 2D (Figure 1.2), ou en huit pour la 3D (formation d'un outree).
- ✓ L'algorithme arrête les subdivisions dès qu'une précision fixée est atteinte, ou si la case produite n'est plus partiellement obstruée.

La précision de ce mode de représentation de l'environnement dépend de la taille de la cellule de base, plus les cellules sont grandes moins la représentation est précise et inversement [Par07].

Une évolution de ce modèle est apparue sous la forme des grilles hiérarchiques [ST05]. Cette méthode décrit l'espace navigable par une succession de grilles de plus en plus précises, organisées sous forme d'arbre.



**Figure 1.2 :** Exemple de grilles régulières

Les méthodes à base de grilles sont fortement utilisées en animation comportementale [Kuf98] du fait de leur simplicité de mise en œuvre et de leur rapidité d'exploitation. On peut ainsi voir des animations de milliers d'individus basées sur ce mode de représentation [TLC02].

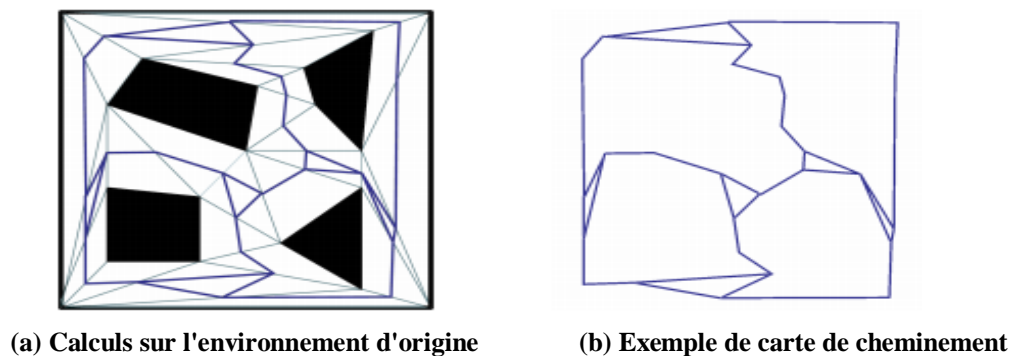
Cette méthode est donc d'autant plus avantageuse que l'environnement est peu dense en obstacles.



### 2.1.2 Cartes de cheminement

Les cartes de cheminement discrétisent l'espace navigable sous la forme d'un réseau de chemins. Ce réseau est obtenu en reliant des points clefs répartis à l'intérieur de l'environnement (Figure 1.3) [Par07]. Cette méthode permet de calquer un environnement 3D en 2D, rendant ainsi les calculs moins longs car les déplacements y sont désormais plans. Les plans 2D ainsi extraits de l'environnement peuvent être légendés de façon à faire apparaître les bâtiments comme obstacles pour une navigation urbaine et de marquer les zones navigables [MCP<sup>+</sup>03]. Ces zones peuvent également être divisées en les numérotant, permettant ainsi d'extraire un graphe spatial hiérarchique liant les zones entre elles [LD04]. Le choix de navigation entre les zones peut donc s'effectuer en parcourant ce graphe [Avr08].

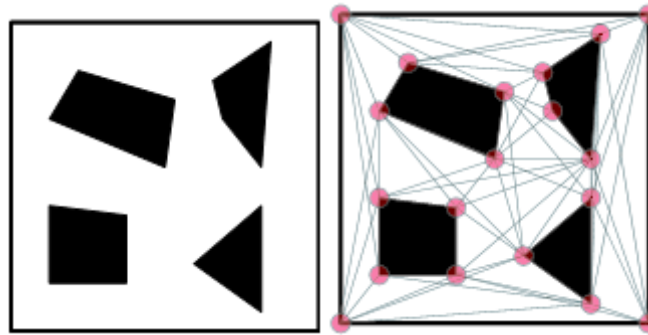
Plusieurs méthodes existent pour créer des cartes de cheminement, différentes dans la manière de créer et de relier les points clefs [Lam03].



**Figure 1.3:** Exemple de carte de cheminement. A gauche, triangulation de Delaunay (gris) de l'environnement d'origine, et carte de cheminement déduite (bleu). A droite, un exemple de carte de cheminement obtenue.

#### ✓ Graphe de visibilité

Cette méthode utilise les sommets des polygones représentant les obstacles comme points clefs de la carte de cheminement [Lam03]. Les points clefs sont ensuite reliés deux à deux s'ils sont mutuellement visibles, c'est à dire si l'on peut tracer une ligne droite passant par les deux points sans rencontrer d'obstacle. Les graphes ainsi créés minimisent les distances parcourues [ACF01], assurant d'obtenir des chemins de longueur minimale. La taille du graphe généré est ici dépendante du nombre de points mutuellement visibles, et est donc d'autant plus importante que l'environnement est ouvert avec des obstacles ponctuels et disparates [Par07].



**Figure 1.4** Graphe de visibilité (à droite) calculé sur l'environnement (à gauche). Chaque cercle (rouge) représente un sommet de la géométrie de l'environnement et chaque segment une relation de visibilité entre ces sommets. Il est à noter que les bordures des obstacles appartiennent au graphe de visibilité.

### Diagramme de Voronoï généralisé

Cette méthode est basée sur une notion d'équidistance aux obstacles de l'environnement. Pour se faire, un ensemble de sites sont évalués au sein de l'environnement, correspondant aux obstacles, dont les intersections vont former les points clefs. Les chemins ainsi générés maximisent la distance aux obstacles. Ce calcul s'avère complexe, mais son approximation peut être obtenue rapidement par des méthodes utilisant les cartes graphiques [HK+99], où le calcul est obtenu directement en effectuant le rendu des sites. Une autre méthode utilise la triangulation de Delaunay pour obtenir les points clefs du diagramme de Voronoï généralisé, en se servant du centre des triangles calculés. La carte de cheminement ainsi produite peut être considérée comme un condensé des informations de la triangulation, ne contenant plus la définition géométrique des obstacles de l'environnement [Par07].

### Cartes de cheminement probabilistes

Avec cette méthode, la définition géométrique de l'environnement n'est pas utilisée comme support direct de la construction.

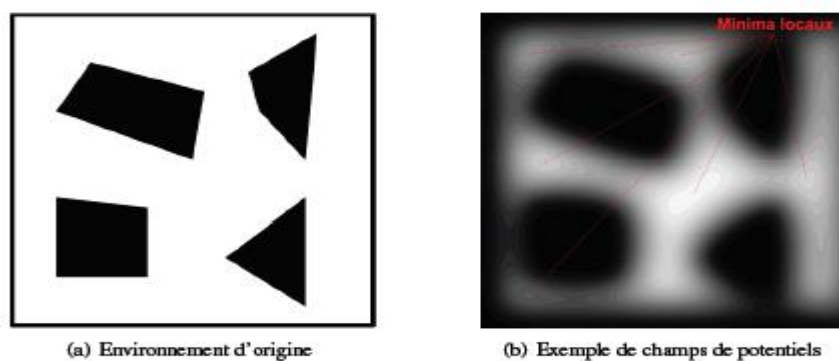
En effet, les points clefs sont ici obtenus par une distribution aléatoire au sein de l'environnement navigable [Ove02]. Deux points sont ensuite reliés s'il existe un chemin libre de collision entre eux. Cette méthode est plus largement utilisée en planification de mouvement [CLS03, PLS03] qu'en navigation, afin de générer des déplacements assez complexes (sauter, se baisser, marcher sur des piliers).

Pour conclure, les cartes de cheminement présentent le net avantage de fournir une description très condensée de l'environnement, ne nécessitant une prise de décision qu'au niveau des points clefs. Néanmoins, leur définition seule n'est pas suffisante pour gérer la complexité de la locomotion humaine. Les représentations sous forme de cartes de cheminement semblent donc bien adaptées à un processus de planification de chemin général, ne tenant pas compte des autres entités, mais beaucoup moins à un processus de navigation, gérant lui les mouvements locaux [Par07].

### 2.1.3 Champs de potentiel

Le modèle à base de champs de potentiels consiste en une définition de l'environnement permettant directement de résoudre les déplacements de personnes [Par07]. Un potentiel est donc défini pour chaque point de l'environnement comme la somme des potentiels de répulsion liés aux obstacles avec le potentiel d'attraction lié au but. L'entité étant localisée dans l'environnement, la direction à prendre pour converger vers son but est alors opposée au gradient de potentiel défini en ce point [Avr08].

Un gradient de forces, ou champ de potentiel, est alors déduit en chaque point de l'environnement comme étant une somme pondérée, le plus souvent par la distance, des potentiels de répulsion et du potentiel lié au but (Figure 1.5). La navigation d'une entité est alors simulée par une descente de gradient depuis sa position dans l'environnement [Par07].



**Figure 1.5:** Carte de champs de potentiels

Les méthodes basées sur les champs de potentiels s'avèrent simples et efficaces, mais posent le problème des minima locaux : zones de l'environnement où un potentiel minimal isolé apparaît (Figure 1.5). Ainsi, la méthode de navigation associée va pousser l'entité à se déplacer vers le minimum local le plus proche, qui ne représente pas forcément son but. Pour pallier ce

---

type de problème, des méthodes à base de marche aléatoire sont utilisées. Par exemple, dans RPP (Random Path Planner) [BL91], lorsqu'un minimum local est atteint, un ensemble de configurations aléatoires sont tirées puis testées avec une phase de sortie du minimum et une phase de convergence vers le prochain minimum. Les informations sont alors stockées dans un graphe dont les nœuds sont les minima locaux et les arcs traduisent des chemins entre deux minima.

De manière générale, les méthodes à base de champs de potentiels ne sont pas applicables directement à la simulation d'humains, du fait du manque de souplesse dans la méthode de contrôle. Notons tout de même que cette technique a deux grands avantages qu'il serait bon de conserver dans une évolution permettant une décision individuelle plus importante. Premièrement, cette méthode permet la fusion de l'information au sein de l'environnement, traduisant tout ce qui intervient dans la navigation par des potentiels qui sont mélangés. Deuxièmement, et c'est une conséquence directe du premier point, ces méthodes introduisent une abstraction très forte de l'environnement, grâce à laquelle l'individu ne raisonne plus sur des entités perçues indépendantes (que ce soit la topologie des lieux ou les autres individus), mais directement sur une abstraction spécialisée pour sa tâche de déplacement [Par07].

## 2.2 Représentation des zones de navigation

L'information environnementale qui doit être extraite ou interprétée dépend du niveau d'abstraction du raisonnement que possède l'agent autonome. Cela signifie qu'il faut adopter une certaine extrapolation de ces informations, car par exemple un feu tricolore peut, pour certains agents représenter un obstacle à éviter en tant que piétons, tandis qu'un autre cherchant à traverser la rue va chercher à capter l'information présente sur ce même feu et non à l'éviter. S.Donikian et G.Thomas présentent un modèle de piéton associé à l'utilisation de diverses informations en fonction des variations de son comportement [TD00].

### ✓ Types de zone de navigation

Afin d'améliorer la planification de chemin des agents virtuels, l'une des premières informations primordiales à introduire est celle des différentes zones de navigation. En effet, dans la rue nous constatons que certaines zones de navigation appartiennent majoritairement à un type précis d'entités mobiles telles que les trottoirs pour les piétons, les rues pour les voitures ou les couloirs de bus...pour les bus. Ce type d'information peut être intéressant à exploiter pour affilier à ces zones de navigation, un type d'entités mobiles approprié et donc des règles

---

différentes à respecter. Par exemple, affilier à la route les règles du code de la route et au trottoir celui du comportement piétonnier. Ce dernier est expliqué en détail par F.Lamarche et S.Donikian [LD04].

#### ✓ **Découpage des lieux**

Un découpage global de l'environnement en différentes zones de navigation ne suffit pas pour améliorer la simulation d'un piéton. Un trottoir, n'est pas seulement un lieu où l'on marche mais également un lieu convivial où se mélangent boutiques, arrêt de bus, poubelles, piétons ou centres commerciaux. Notre comportement varie en fonction de ce type d'informations, le découpage d'une ville ou d'une rue doit donc se faire en prenant en compte ces informations afin d'améliorer la planification de chemin ainsi que l'adaptation du comportement. Ce découpage peut être réalisé de différentes manières, plusieurs méthodes présentant une hiérarchisation à l'aide d'arbres ont été proposées ainsi que des méthodes utilisant un système de cartes 2D ou 3D munies de diverses informations [MCP+03, BLA02].

### **2.3 Planification de chemin**

Afin d'exploiter une représentation de l'environnement, les simulations microscopiques ont généralement recours à un procédé nommé planification de chemin. Ce procédé peut être comparé à un comportement exposé en psychologie, qui a pour but d'extraire un chemin reliant la position courante de l'entité à une destination donnée. Une méthode classique pour effectuer cette planification consiste à utiliser des algorithmes de parcours de graphe. En effet, toutes les représentations topologiques que nous avons introduites sont exploitables sous la forme d'un graphe de points de passages, où les nœuds représentent les zones navigables et les arcs les connexions entre ces zones.

#### ✓ **Algorithmes de parcours**

Différents algorithmes de parcours de graphe peuvent être utilisés dans le cadre de la planification de chemin. Ceux que nous décrivons ici se basent sur un critère de minimisation de coût pour extraire le plus court chemin. Ce coût représente souvent une notion de distance spatiale, mais nous verrons dans la section suivante que des heuristiques plus complexes peuvent être utilisées [Par07].

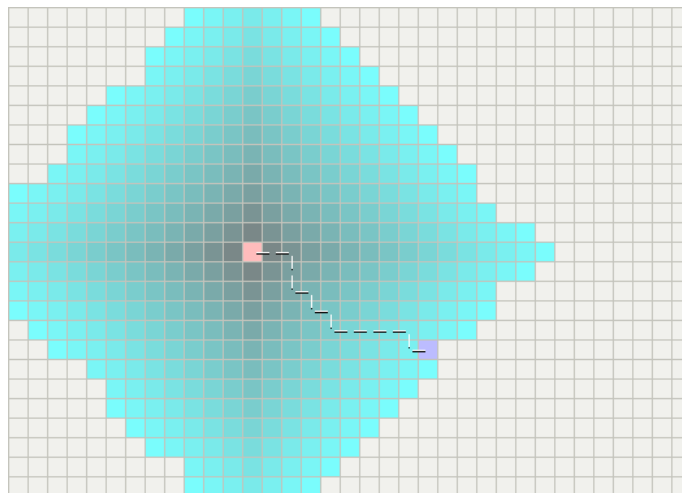
**Dijkstra** L'algorithme de Dijkstra permet de trouver l'ensemble des meilleurs chemins entre deux nœuds du graphe. Cet algorithme utilise une file de priorité où il stocke pour chaque nœud exploré deux informations:

- ✓ la distance parcourue depuis le nœud de départ jusqu'au nœud courant.
- ✓ le nœud précédent, i.e. parcouru avant le nœud courant.

L'algorithme commence avec un nœud source correspondant généralement à la position courante de l'entité, qui n'a donc aucun prédécesseur et un compteur de distance nul. Cet algorithme fonctionne directement sur le graphe topologique, par exemple les cartes de cheminement ou les grilles [Fou06].

Les intérêts majeurs de cet algorithme sont sa robustesse (si un chemin existe il sera forcément trouvé) et son abstraction totale de la destination, si ce n'est comme condition de fin.

Dans le diagramme suivant, le carreau rose est le point de départ, le carreau bleu représente le but et l'exposition de secteurs de sarcelle (d'élimination) les secteurs que l'algorithme de Dijkstra a parcouru. Les secteurs de sarcelle les plus légers sont les plus éloignés du point de départ et forment ainsi "la frontière" de l'exploration (Figure 1.6).



**Figure 1.6:** L'algorithme de Dijkstra

**A\*** Dans les cas où la performance de la recherche est primordiale, comme en animation comportementale (dans le cas des jeux vidéos par exemple), l'algorithme A\*[Nil82] est plus utilisé. Celui-ci fonctionne d'une façon similaire à l'algorithme de Dijkstra mais en ajoutant un coût prédictif aux nœuds correspondant au reste du chemin à parcourir. Le coût total est donc la

---

longueur réelle du chemin jusqu'au nœud, incrémentée par une valeur prédite pour le chemin menant au but, calculée par une heuristique. L'algorithme va ainsi parcourir les nœuds dans l'ordre croissant de leurs coûts associés. La rapidité de convergence de cet algorithme est directement dépendante de la qualité de l'heuristique employée. Dans le cas de la recherche de plus court chemin, l'heuristique employée est une estimation de distance, généralement la norme géométrique séparant le nœud courant du but [Fou06].

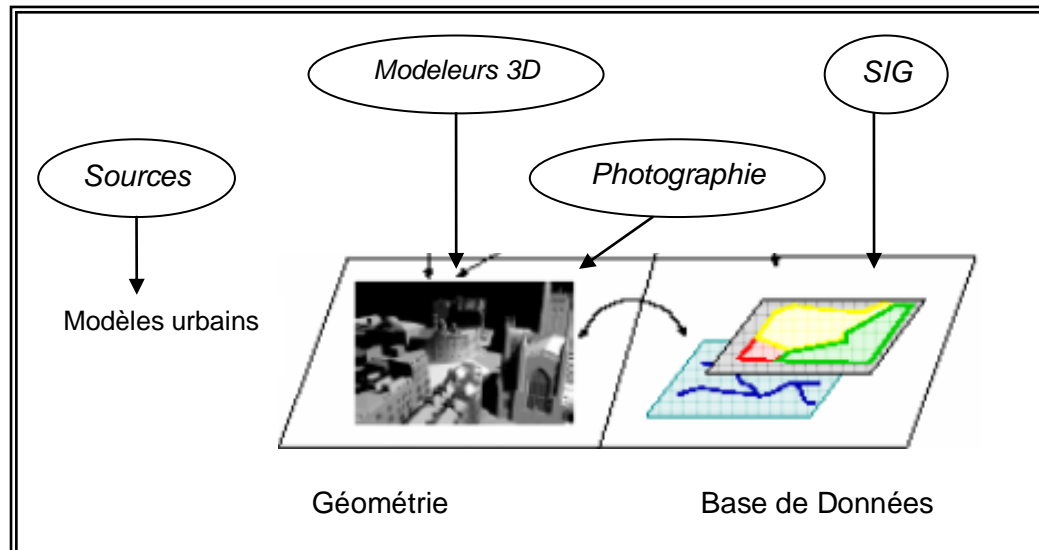
L'avantage de cet algorithme réside dans sa rapidité calculatoire. Son inconvénient majeur réside dans le recours à une heuristique. En effet, plus l'évaluation de la longueur de chemin sera complexe, pouvant faire intervenir d'autres paramètres que la distance (par exemple un coût associé à la sémantique), plus cette heuristique sera difficile à expliciter. Ainsi, il est difficile d'utiliser cet algorithme pour des planifications de chemin dont le but n'est pas clairement identifié dans le graphe topologique, comme pour des recherches exploratoires où à buts multiples [Par07].

### 3. Définition générale d'un environnement virtuel

Généralement l'environnement urbain est fondé sur des réseaux de circulation : routier, piétonnier. C'est au niveau de ces réseaux que se passe l'essentiel des actions et des interactions entre piétons et entre piétons et conducteurs. De plus, ce sont ces réseaux qui structurent la ville, ils fournissent les chemins pour aller d'un point à l'autre, c'est à partir de ces réseaux que l'on accède aux habitations, aux places et aux parcs. L'environnement contient donc des réseaux de circulation complète. Selon son comportement, le piéton considérera un élément du mobilier urbain comme un obstacle, une source d'information ou d'interaction. Comme une carte, le modèle urbain est représenté par un ensemble de graphiques en 2 dimensions auxquelles sont associés des attributs. Définir l'environnement urbain consiste à déterminer les relations existant entre les différents espaces, puis à classer et à décrire ces espaces urbains ainsi que les objets qu'ils contiennent. Cette structuration est guidée par la connaissance urbaine et adaptée au comportement du piéton; l'environnement contient des informations directement utilisables pour les activités de navigation, de circulation, de respect du code de la route et d'interférence. [Tho99].

#### 4. Les Sources et les modèles d'une ville virtuelle

Diverses applications (aménagement urbain, étude des flux, placement de bornes de transmission) nécessitent une description du milieu urbain. Selon les applications, les niveaux de détail sont différents ; les outils et les sources de modélisation aussi. La gamme de sources disponibles pour générer un environnement urbain est montrée dans la figure 1.7.



**Figure 1.7:** Sources et modèles pour une ville virtuelle

Les modeleurs géométriques sont les outils traditionnels de construction d'environnements virtuels 3D. Quelques techniques de reconstruction de scène à partir d'images sont ensuite mentionnées.

Pour animer des piétons dans un environnement virtuel urbain, il faut disposer d'un modèle géométrique de la ville ; une modélisation du réseau routier est aussi utile puisque les trottoirs, (espaces de circulation privilégiés des piétons), sont des composants du réseau routier [Tho99].

Une animation comportementale est constituée d'entités autonomes dynamiques (conducteur de voiture ou de camion, piéton, cycliste) évoluant dans un environnement virtuel (la ville). Ces entités comportementales sont capables de percevoir, de décider et d'agir. L'immersion d'entités autonomes dans des environnements virtuels nécessite une représentation de l'environnement qui ne se limite pas à la géométrie. La représentation de l'environnement



---

doit contenir les informations nécessaires au fonctionnement des modèles perceptifs et décisionnels des entités.

#### 4.1 Modeleurs géométriques 3D

Les modeleurs 3D permettent de construire des objets géométriques et de les intégrer dans une scène. Dans ces modeleurs, la création passe par la manipulation de primitives graphiques en 3 dimensions : points, entités filaires (lignes et arcs), surfaciques (polygones, surfaces splines) et volumiques (simples et complexes). Le réalisme des objets et des scènes est finalement obtenu en leur associant des matériaux et des textures (photographies).

Tübingen et Los Angeles sont des exemples composés de modèles géométriques simples qui permettent de naviguer en temps réel dans les villes virtuelles. Tübingen est utilisée pour étudier le comportement humain à travers ses modes d'acquisition, de traitement, de représentation et d'utilisation d'informations sensorielles. Le Los Angeles virtuel a été conçu pour un public d'urbanistes et d'architectes dans le but de permettre à des non-experts de visualiser et d'évaluer des projets urbains. Les modèles doivent donc être soignés et réalistes pour la valorisation des projets.

#### 4.2 Modeleurs routiers

Les modeleurs routiers se concentrent donc sur une modélisation fine et réaliste des routes. Ces modeleurs assistent le concepteur et vérifient la cohérence des scènes construites. Par exemple, lorsque la courbure d'une route est trop forte par rapport à sa largeur, le système expert rejette le modèle.

Logical Road Network et EVARISTE sont deux systèmes exposés visent à la construction de bases de données routières adaptées à la simulation de conduite. Les structures générées par les deux systèmes répondent au besoin de créer une ((vie ambiante)) dans les simulateurs de conduite. Cette vie ambiante est possible si des véhicules autonomes naviguent dans la scène.

Pour naviguer dans la scène, les véhicules doivent disposer, en plus de la géométrie, d'une structure topologique décrivant le réseau routier et d'informations logiques (les voies de circulation, sens des voies, etc.) et symboliques (nom des routes, etc.). Dans les deux systèmes, la gestion de la géométrie des intersections pose problème. De plus, la vie ambiante n'est

composée que de véhicules, les pipetons et les cyclistes n'ont pas de place dans ces environnements.

## 5. Subdivision de l'environnement

S.Paris [Par07] est présenté une organisation des données topologiques pour permettre une navigation optimale des entités, l'ensemble des informations proposées sont sous la forme de pré-calculs pour les données statiques, ou bien des fonctionnalités pour les données dynamiques.

### 5.1 La représentation topologique

La description d'un environnement concerne la façon de représenter sa topologie, pour donner une sémantique à cette topologie en l'informant avec la typologie des zones extraites. [Par07].

#### 5.1.1 Subdivision spatiale informée

La représentation topologique est basée sur l'algorithme de subdivision qui produit des cellules convexes par une triangulation de Delaunay filtrée. [Lam04], un triangle englobant la scène est défini, qui représentera les limites de l'environnement simulé (Figure 1.8). La subdivision est ensuite effectuée, en tenant compte des segments définissant les murs (bordures rigides), produisant des cellules convexes en créant des bordures franchissables (Figure 1.8) [Par07].

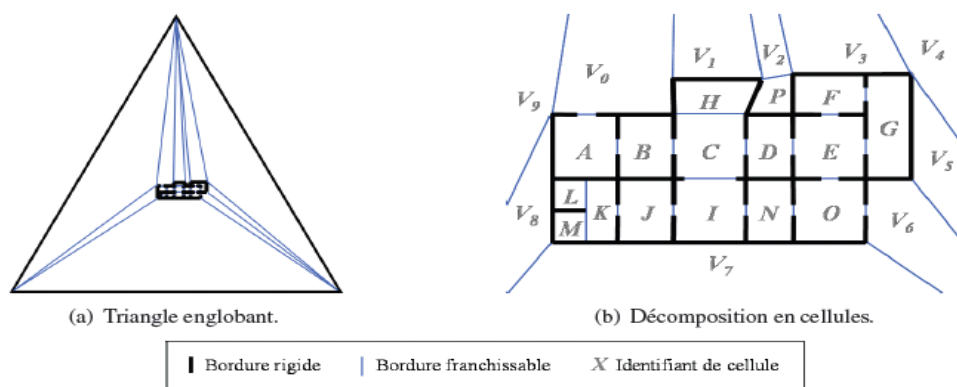


FIG. 4.1: Subdivision spatiale préalable à l'abstraction.

#### Figure 1.8: Subdivision spatiale préalable à l'abstraction

Un graphe est extrait depuis cette subdivision, dont les nœuds représentent les cellules obtenues et dont les arcs représentent leurs relations de voisinage (Figure 1.8). Notons que seules les cellules navigables sont extraites de la subdivision, le découpage interne aux obstacles n'étant pas nécessaire pour les déplacements d'entités. Les cellules dont l'un des sommets appartient au

triangle englobant : ces cellules sont dénommées virtuelles, signifiant qu'elles ne correspondent pas à l'intérieur de l'environnement simulé, mais à l'extérieur. Pour finir, toute cellule qui est à la fois connexe à une cellule virtuelle et à une cellule non virtuelle est dénommée entrée/sortie.

Ce premier découpage produit énormément de cellules, dépassant rapidement le millier. Principalement pour des raisons de rapidité de calcul, mais aussi pour une question de facilité d'exploitation, il n'est pas envisageable d'exploiter directement ce graphe de subdivision.

Un processus complémentaire permettant une simplification des données topologiques manipulées est proposée dans le travail de S.Paris.

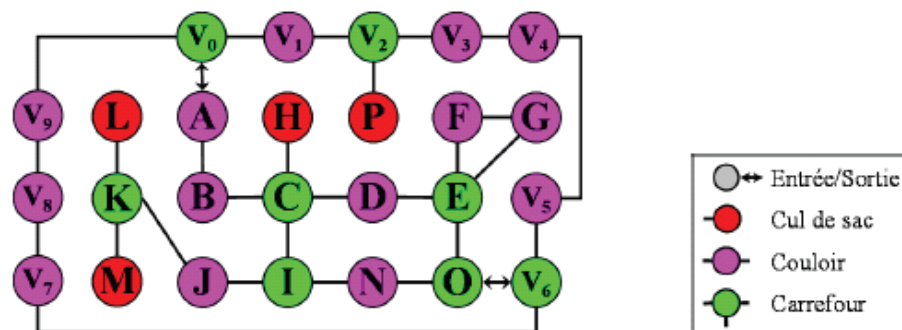


Figure 1.9: Graphe topologique extrait de la subdivision

### 5.1.2 L'abstraction topologique

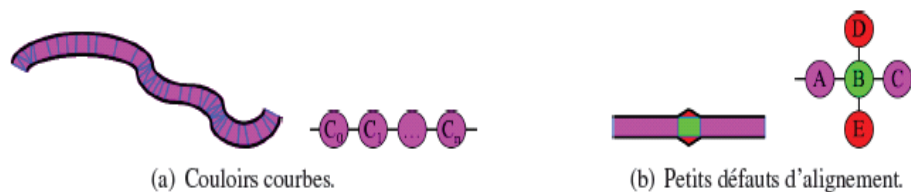
L'abstraction topologique a deux buts principaux : réduire le nombre d'éléments nécessaires pour décrire l'environnement, et proposer une définition plus conceptuelle et intuitive des zones navigables. L'effet recherché est ainsi de s'éloigner de la définition géométrique fournie à la base, pour se rapprocher d'une définition plus procédurale, tout en cherchant à conserver les informations essentielles [Par07].

L'abstraction proposée par S.Paris [Par07] est fondée sur un mécanisme de regroupements successifs. Un nouveau graphe est construit dont les nœuds vont correspondre à un sous-ensemble du graphe source, produisant ainsi un graphe hiérarchique de plus en plus abstrait. Afin de permettre l'exploitation de ce graphe hiérarchique, son parcours transversal est permis : chaque élément de base connaît son équivalent abstrait, et inversement.

S.Paris [Par07] a été proposé deux niveaux d'abstraction depuis le graphe de subdivision, produisant un graphe hiérarchique à trois couches.

### ✓ Premier niveau d'abstraction

Le premier niveau d'abstraction a pour but principal de filtrer le découpage obtenu lors de la subdivision. En effet, la triangulation de Delaunay est une méthode très sensible aux aléas géométriques, tels que les courbes et autres défauts d'alignements (Figure 1.9). Ainsi, lorsque ce cas se présente, un très grand nombre de cellules sont produites, augmentant d'autant la complexité d'exploitation du graphe résultant.



**Figure 1.10:** Aléas géométriques se répercutant sur la subdivision.  
Pour chaque figure; à gauche la subdivision spatiale, à droite le graphe obtenu

Un algorithme de regroupement basé sur deux heuristiques est utilisé pour extraire des groupes de cellules pouvant être assimilés à une sémantique unique.

### ✓ Conservation de la convexité.

La première heuristique va chercher à conserver au maximum l'aspect convexe des groupes obtenus. Cela a pour but principal de conserver les propriétés de visibilité obtenues par la triangulation de Delaunay, mais aussi de conserver les espaces représentant les goulets d'étranglement. Bien sûr, cette convexité ne peut être entièrement conservée, sous peine de bloquer le regroupement trop rapidement, mais sera dégradée au minimum. Pour configurer le niveau de dégradation, cette heuristique est sensible à un paramètre  $k$  ( $0 < k < 1$ ), où la valeur 1 correspond à la conservation maximale de la convexité, et 0 signifie que la convexité n'est plus à maintenir.

### ✓ Maximisation des carrefours.

Cette deuxième heuristique restreint les possibilités de voisinage d'un groupe, pour maximiser le ratio de nœuds de type carrefour. Les règles topologiques suivantes sont appliquées:

1. Un carrefour ne peut pas être voisin d'un autre carrefour ;
2. Un couloir ne peut être voisin que de nœuds de type carrefour ;
3. Un cul de sac ne peut être voisin que d'un nœud de type carrefour.

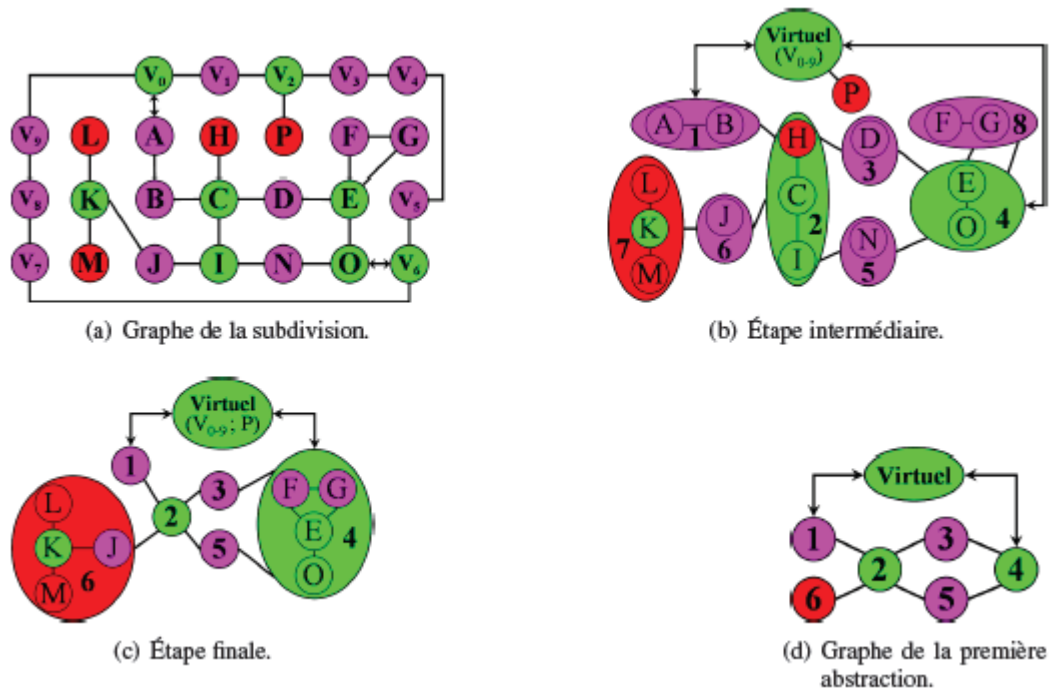
L'intérêt de maximiser les carrefours est que ce sont les seuls nœuds nécessitant une prise de décision lors du parcours du graphe, pour choisir vers quel voisin se diriger. Les nœuds d'un autre type peuvent quant à eux être traversés trivialement, les couloirs menant à leur autre voisin et les culs de sac arrêtant le parcours. Ainsi, le fait d'augmenter la proportion de carrefours aura pour effet de maximiser le nombre de prises de décisions relativement au nombre de nœuds parcourus, et donc réduira le temps d'évaluation passé à effectuer des opérations non discriminantes [Par07].

L'algorithme de regroupement est fortement récursif, basé sur une exploration en profondeur du graphe avant de pouvoir prendre une décision. Chaque étape de l'algorithme traite une cellule en se basant sur sa typologie, avec les objectifs suivants :

- 1. Cellules virtuelles** : Regrouper toutes les cellules virtuelles en un groupe virtuel, puis fusionner dans ce groupe toutes les cellules connexes de type cul de sac. Continuer par l'étape 2 ou 3 suivant le type des cellules connectées Cc non regroupées (les entrées/sorties).
- 2. Cellules de type couloir** : Filtrer la discrétisation excessive de la subdivision spatiale dans les zones peu ouvertes.
- 3. Cellules de type carrefour** : Filtrer la discrétisation excessive de la subdivision spatiale due à des obstacles ponctuels, ou à des défauts d'alignement sur les bordures de zones ouvertes.
- 4. Cellules de type cul de sac** : Créer un groupe de type cul de sac avec la cellule courante. Notons que ce groupe sera éventuellement fusionné avec son voisin de type couloir ou carrefour à cause des tests des étapes 2 et 3.

La figure 1.11(b) correspond à l'exploration en profondeur du graphe de cellules, Les séries de couloirs sont regroupées (groupes 1 et 8), de même que les carrefours voisins avec éventuellement les culs de sac (groupes 2, 4, et 7). Le groupe 7 est transformé en cul de sac, n'ayant plus qu'un seul voisin. Enfin, chaque couloir seul est attribué à un groupe couloir temporaire (groupes 3, 5, et 6). La figure 1.11(c) correspond au dépilage des tests de

l'algorithme. Le groupe virtuel y absorbe la cellule cul de sac connexe P. Le groupe couloir 6 est fusionné avec son voisin cul de sac 7. Le groupe couloir 8, étant connecté deux fois au même groupe carrefour, est absorbé par celui-ci. On obtient (Figure 1.11(d)) un graphe abstrait ne contenant plus que sept nœuds contre vingt six au départ [Par07].



**Figure 1.11:** Déroulement de la première abstraction sur le cas de test

✓ **Deuxième niveau d'abstraction**

Le but de deuxième niveau d'abstraction est de produire des zones plus globales, caractérisant rapidement la typologie des espaces, permettant ainsi une discrimination efficace lors de l'exploitation du graphe [Par07].

Une deuxième est basée sur les mêmes heuristiques que la précédente, fonctionnant cette fois-ci sur les groupes pour obtenir des zones. La contrainte sur la convexité est cette fois-ci plus souple que les groupes [Par07].

On obtient un graphe beaucoup plus simple que celui de la subdivision représentant très globalement les chemins envisageables dans l'environnement [Par07].

**5.1.3 Les nœuds conceptuels**

À la fin d'une manipulation effectuée sur la représentation de l'environnement des nœuds conceptuels ont été introduits permettant notamment de l'orienter, mais aussi de préparer

---

son amélioration sémantique. La dénomination conceptuelle a été choisie car ces nœuds, contrairement aux cellules de la subdivision, ne représentent pas un espace physique, mais plutôt une capacité interne du graphe [Par07].

Plusieurs utilisations sont faites de ces nœuds. Ils permettent entre autre de représenter plus précisément les entrées/sorties de l'environnement, en leur associant un sens de parcours, ces nœuds sont utilisés ainsi pour situer l'interaction en représentant certains objets interactifs. [Par07].

## 5.2. Un environnement informé

La conservation de l'information est indispensable pour permettre l'exploitation d'une abstraction de l'environnement dans un cadre de simulation, l'abstraction doit non seulement être capable de restituer les informations issues de la définition graphique d'origine, mais aussi de les organiser au mieux pour autoriser leur utilisation efficace et rapide [Par07].

### 5.2.1 Informations statiques

Premièrement des données statiques de l'environnement sont associées au graphe topologique. Un pré-calcul de ces données est stocké directement dans les groupes, afin d'en accélérer l'accès au cours de la simulation. Notons que bien que ces informations soient stockées dans le premier niveau d'abstraction, leur pré-calcul se base sur les informations issues directement de la subdivision spatiale [Par07].

On a Plusieurs caractéristiques géométriques globales du groupe :

**Surface, barycentre** : ces informations générales auront une fréquence d'utilisation importante et sont donc directement stockées.

**Boîte englobant orientée** : cette boîte sert durant le processus d'abstraction, et est donc stockée directement dans le groupe, puis modifiée lors d'une éventuelle fusion entre plusieurs groupes.

**Grille orientée** : basée sur la boîte englobant orientée, cette grille servira pour le calcul dynamique des densités de personnes.

### 5.2.2 Informations dynamiques

S.Paris [Par07] a été proposé des fonctionnalités permettant la récupération rapide des informations. Les informations dynamiques concernées par ces processus sont les flux de

---

personnes, les densités de personnes, et la détection du voisinage. En ce qui concerne la détection du voisinage F. Lamarche [Lam03], a décrit un graphe de voisinage basé sur une triangulation de Delaunay entre les entités dynamiques, filtrée par la topologie.

Alors la circulation dans un environnement urbain nécessite des connaissances riches et diverses sur l'environnement et aussi sur le comportement des individus, et là nous présentons une architecture pour un environnement informé.

## 6. Environnement informé dans un contexte urbain

### 6.1 Introduction

Pour faciliter la prise de décision du personnage, il est possible d'augmenter le nombre d'informations que l'environnement fournit aux personnages, d'avoir une sorte de « virtualité augmentée » : plutôt que de fournir des informations sur les géométries et laisser les personnages faire un traitement pour les transformer en symboles, l'environnement fournit directement ces symboles qui ont été associés aux objets par le concepteur de l'environnement.

Laboratoire d'Informatique graphique (LIG) propose un système complet de simulation temps-réel [FMS+99] dans le but de simuler des environnements urbains peuplés d'acteurs au comportement réaliste. Des méthodes et des outils sont proposés pour animer des humains virtuels dans une ville. La vie ambiante est recrée par la présence de foules dans la ville. La mise en œuvre du modèle de foule (CROWD) nécessite un modèle de ville (CITY) pour établir la connexion entre les agents et l'environnement et synchroniser les actions des agents. Six modules sont utilisés pour réaliser les simulations [Tho99], chacun a sa propre spécification comme il est décrit ci-dessous:

1. **CITY (virtuel city database):** ce module gère et dispense les informations contenues dans la base de données urbaines durant la simulation. La base de données est un environnement informé contenant les informations nécessaires à l'animation d'humains virtuels dans une ville [FBT99].
2. **SMART OBJECTS (smart object management):** ce module gère les interactions entre les agents et les objets. Pour chaque interaction possible avec l'objet, des plans prédéfinis utilisables par les acteurs sont stockés dans l'objet [KT98].
3. **CROWD (humain crowd management):** contrôle les mouvements et les comportements de groupes d'agents, les foules peuvent performer automatiquement les



---

comportements pré-programmable, ou d'être guidée par un agent de contrôle ou un groupe de la foule (simulation de foules) [MT97, MBC+98].

4. **AGENTLib (agent management)**: module de contrôle du mouvement et du comportement bas niveau.
5. **RBBS (Rule-Based-Behavior-System)** : l'utilisateur peut spécifier des ordres (par exemple « Allez au supermarché ») ou des intentions aux groupes ou aux agents dans un langage pseudo-naturel. Un ordre est transformé par le système en une règle dont la prémisse est une condition sur l'état de la foule et ses intentions. Les règles sont organisées dans des arbres ; les actions des agents sont déclenchées ou inhibées pendant le parcours de l'arbre des règles [Tho99].
6. **Le contrôleur (communication des systèmes de serveurs)**: synchronise les systèmes de communications entre les premiers modules (leurs clients) et on doit savoir quel message peut comprendre chaque client ? De cette manière un client peut faire n'importe quelle requête au contrôleur, et cela permet la redirection de la requête vers le module correct [FMS+99].

Seuls les modules CITY et CROWD sont analysés, car ce sont ceux qui cadrent avec cet état de l'art. Les autres approches sont difficilement exploitables dans notre cadre d'application, s'adressant à des problématiques d'ordre différent. En effet, l'environnement est structuré et contient des informations pour répondre aux besoins comportementaux de la foule. Nous voyons d'abord comment est construite la base de données CITY, puis l'exploitation qui en est faite par les foules (CROWD) [Tho99]. Les modules doivent communiquer l'un avec l'autre pour réaliser une tâche donnée. Ceci implique qu'il doit y avoir un système d'échanges bien défini de message. Une vue d'ensemble des dépendances entre ces modules est schématiquement décrite dans la figure 1.12. Plus de détails à ce sujet sont présentés dans la communication de section entre les modules [FMS+99].

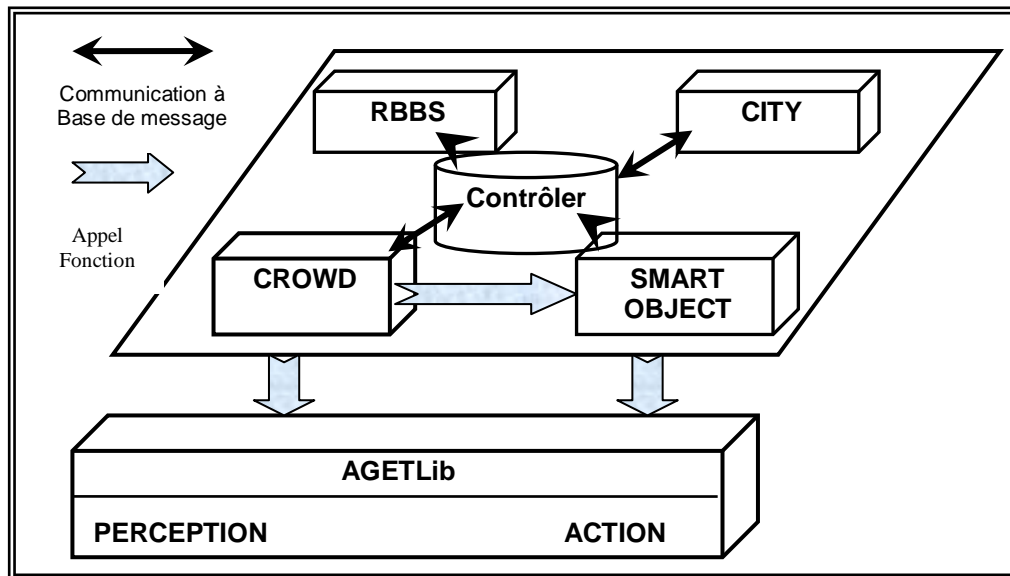


Figure 1.12: Représentation de l'Architecture du système

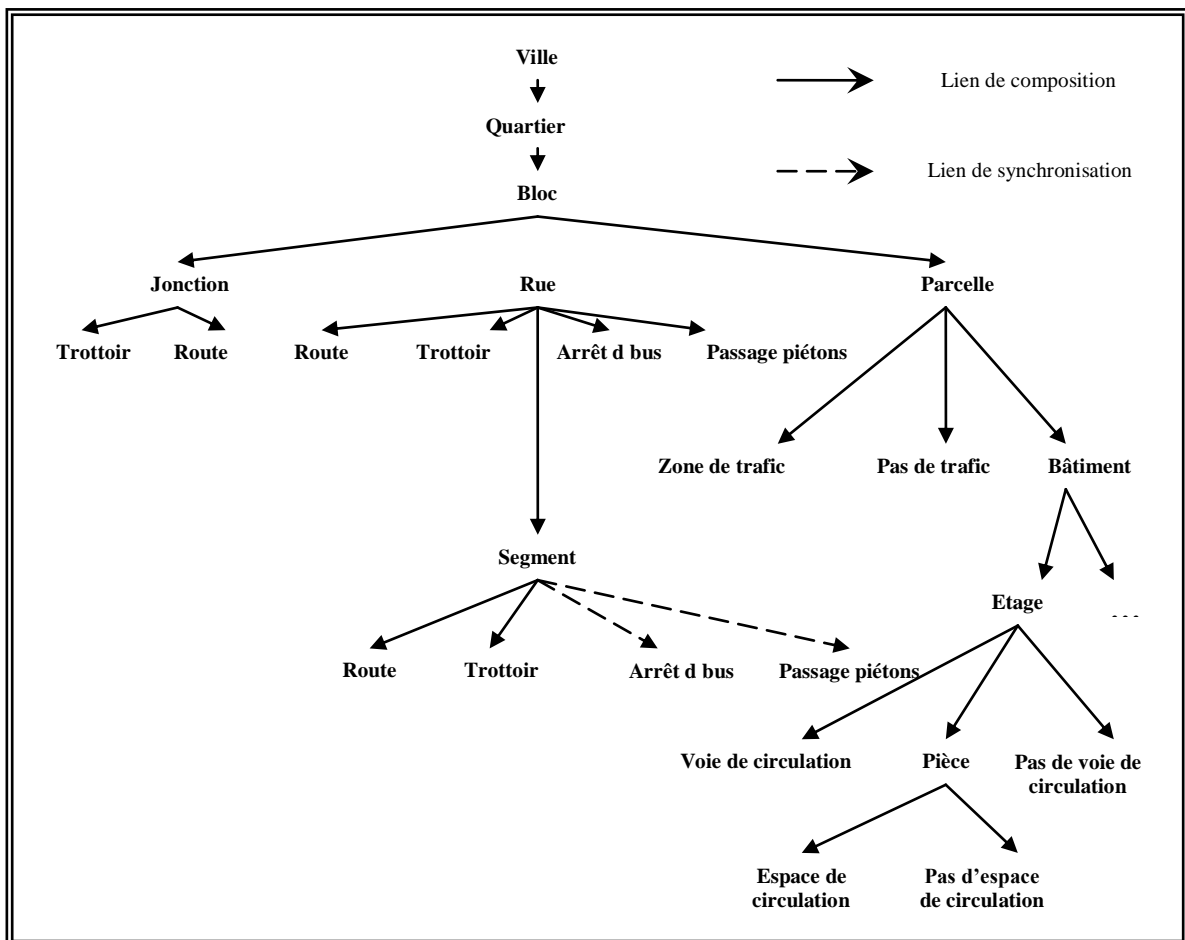
## 6.2 CITY

Le principe est d'être capable de déduire quel action relative à cette information est possible, par exemple dans une ville, on peut dénoter des trottoirs comme des secteurs pour des entités piétonnières, mais cela dans des lieux pareils. Ils peuvent marcher ou avoir des rencontres sociales [DH97]. La base de données d'une ville doit informer tous les mobiles (les objets de mouvement comme les piétons, les voitures, bus et vélos) là où ils peuvent circuler. Dans les cas où les piétons croiseraient un secteur, leurs mouvements doivent être synchronisés avec d'autres mobiles dépendant dans l'état du signal de trafic. Puis l'environnement doit informer les mobiles qu'ils sont dans un secteur de synchronisation et de donner avec d'autre mobiles comment peut-on les organiser, pour accéder efficacement aux informations ? [FMS+99].

Alors que l'activité piétonne peut se résumer en deux méta-actions : l'évolution et l'interaction. Dans une ville, l'évolution des piétons est contrainte par les configurations spatiales (trottoirs, passages-piétons). Quelques exemples d'interactions avec l'environnement sont: « prendre un ascenseur », « monter dans un bus ». Dans le but d'animer des piétons possédant ces comportements, un modèle d'environnement urbain informé est proposé [FBT99]. L'environnement informé est constitué d'« entités environnementales » (ENV). La perception virtuelle est un processus coûteux, les ENV sont un moyen pour remplacer les analyses perceptives par une information directement récupérée dans la base de données (CITY). Une ENV contient différents niveaux d'information, elle est caractérisée par:

- une géométrie, une localisation ;
- une sémantique : la nature des espaces renseigne sur leur fonction : par exemple, un trottoir est un espace réservé aux piétons ;
- une liste d'objets ainsi qu'une liste d'actions exécutables ; la connaissance sur les objets est exploitée pour l'évitement ou pour l'interaction.

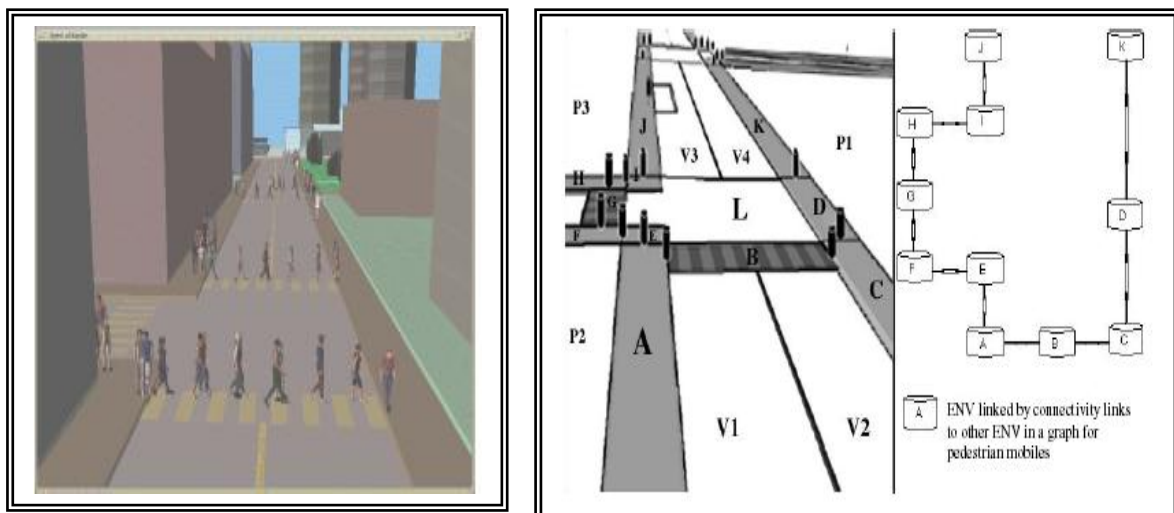
L'environnement informé est une structure hiérarchique composée d'ENVs (Figure 1.13).



**Figure 1.13:** Un environnement informé

La décomposition hiérarchique provient d'une division de la ville en plusieurs régions; cette division est guidée par les propriétés géométriques et fonctionnelles des régions. Il est intéressant de noter dans cette hiérarchie urbaine que les bâtiments ainsi que leurs intérieurs sont représentés ; conceptuellement, les espaces intérieurs et extérieurs sont en effet similaires : voies de circulation (trottoir, couloir), espaces (pièces, parcs) et zones de transition.

Présentement c'est la description de la méthode de construction des *ENVs* (« entités environnementales ») ; en plus des attributs mentionnés ci-dessus, les *ENVs* contiennent des informations permettant de gérer la connexité des espaces et la hiérarchie de la scène. Les *ENVs* sont construites à partir de la scène géométrique 3D de l'environnement urbain. Cette scène, au format **Open Inventor**, est générée sous **3DsMax**. Le format **Open Inventor** est hiérarchique et il est possible de nommer les nœuds. Le concepteur de la scène 3D et le créateur de la base de données adoptent un protocole pour le nommage des régions ; cela permet de générer l'environnement informé à partir de la scène géométrique. Le nom d'une région informé sur son type et sa localisation dans l'arbre. Par exemple, un trottoir TR1 contenu dans une rue RUE1, est labellisé RUE1 TR1. Le nom informé sur le type de l'objet (TR comme trottoir) et sur sa position dans la hiérarchie (le trottoir est descendant de RUE1). Ces informations symboliques (nom des objets, type, ascendant et descendants) sont stockées dans une base de données de l'environnement informé. En plus de la hiérarchie, la topologie est gérée. Les espaces connexes sont reliés à travers des points d'entrée/sortie. Une liste de points d'entrée/sortie est calculée et attachée à chaque ENV selon son type (voir deuxième vignette de la figure 1.14). Par exemple, deux points d'entrée/sortie sont créés aux extrémités d'un trottoir ; seuls les piétons sont autorisés à les franchir. La connexité est gérée entre les descendants d'un même nœud ; par exemple, dans une rue contenant un trottoir et un passage piéton, le trottoir et le passage piétons sont liés par une relation de connexité.



**Figure 1.14:** Circulation de piétons en environnement virtuel urbain

---

Grâce aux ENVs, les informations nécessaires à l'évolution des piétons sont disponibles dans la base de données. La figure 1.14 montre un extrait de simulation montrant des piétons suivant des trottoirs et traversant sur des passages piétons ; le graphe de connexité associé à la scène est donné sur la deuxième vignette, la simulation des interactions des piétons avec les objets de l'environnement est possible grâce à une liste d'objets associée à chaque ENV. Des leurres sont associés aux objets pour fournir les informations nécessaires au comportement humain. Il existe deux catégories de leurres :

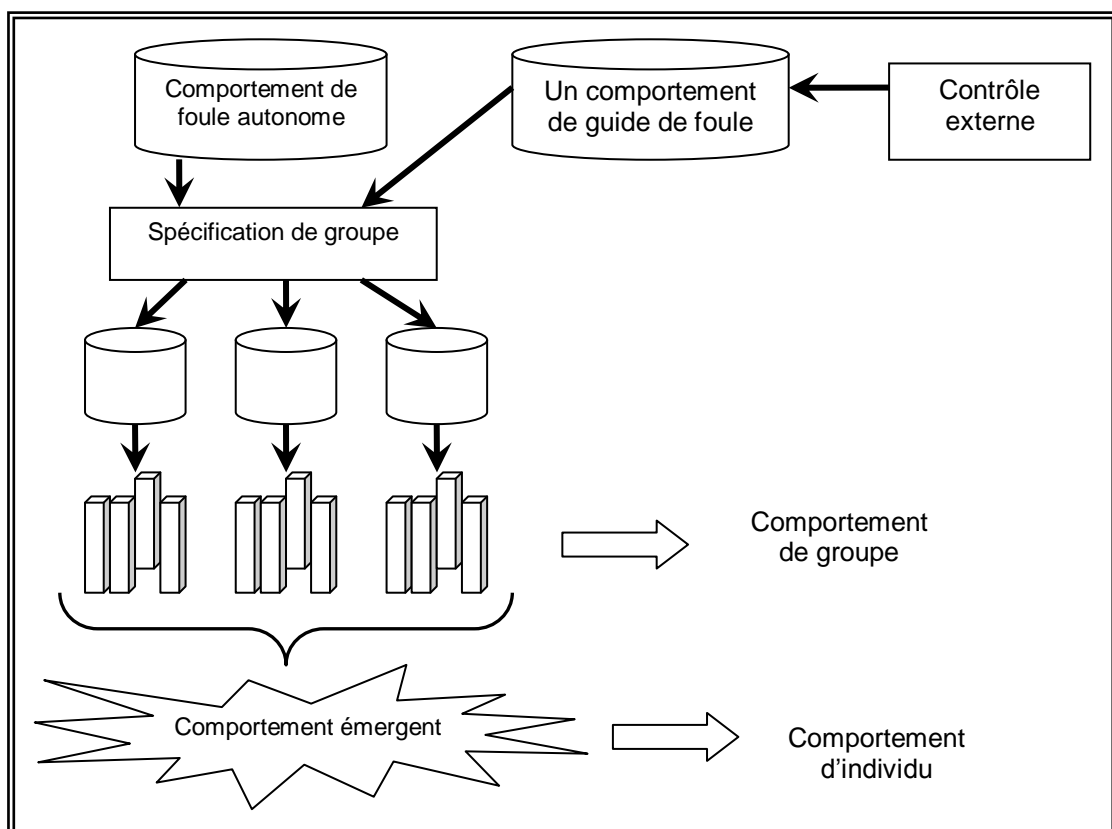
1. *boites englobantes* : deux niveaux de boites englobantes sont gérés. Un niveau grossier est utilisé pour l'évitement, un niveau plus fin pour l'interaction ;
2. *Connaissances sur les actions* : pour monter un escalier, le lure associé à l'escalier contient la taille des marches, leur profondeur, leur hauteur et leur nombre. Un fichier d'images clés peut aussi être associé à l'escalier, il fournit les consignes d'animation des capacités motrices du piéton. Ces informations et leur mécanisme d'affectation aux objets [KT98].

Le module *CITY* est donc chargé de gérer l'environnement informé en cours de simulation. Dans chaque *ENV*, la liste des acteurs est mise à jour. Le principal client du module *CITY* est le module *CROWD*, pour que la foule puisse aller d'un point à l'autre dans la ville, le module *CITY* lui fournit une liste de points d'entrée/sortie associés aux *ENVs*. Pour une meilleure compréhension de l'utilisation et de l'intérêt de disposer d'un modèle informé d'environnement urbain, nous exposons ici le module *CROWD* [Tho99].

### 6.3 CROWD

La simulation des foules humaines (*CROWD*) pour peupler les mondes virtuels fournit un sens plus réaliste de la présence virtuelle de groupe [BGL97]. Dans un environnement urbain virtuel, il est utile de simuler les populations autonomes, c-à-d Les agents qui peuvent avoir un genre de connaissance environnementale (*CITY*), et peut se déplacer et agir l'un sur l'autre avec d'autres agents et leur environnement. En outre, l'utilisateur peut définir les intentions de foule qui seront réalisées par les groupes d'agents. C'est dans le modèle de foule (*CROWD*) où la commande d'autonomie et d'interactivité peut être mélangée dans la même simulation [MBC+98]. Le choix d'une foule autonome pour être le type de foule qui agit selon les intentions prédéfinies et les caractéristiques environnementales, qui seront réalisées par les groupes d'agents sans interposition d'utilisateur pendant la simulation.

L'autre genre de commande de foule actuel est la foule guidée qui peut être guidée par un processus externe. Ceci pourrait être fait par une interface avec (représentation humaine virtuelle commandée par un utilisateur) [MBC+98] ou un agent autonome intelligent [SMG99]. La foule guidée répond aux comportements dynamiques qui peuvent changer en fonction du temps tandis que la foule autonome applique des comportements prédéfinis sans interposition d'utilisateur pendant la simulation. Les exemples des comportements sont: interaction avec des objets [KT98], le déplacement pour atteindre un point spécifique d'intérêt, un ordre de construction clé est celui d'être joué [BHT94], etc... Le comportement de foule est distribué parmi les groupes et les individus, selon des caractéristiques de groupe [MT97].



**Figure 1.15:** Architecture d'un système CROWD

La structure de données de ce modèle de foule est présentée sur la figure 1.15. Au niveau le plus élevé de l'information, une foule est traitée comme entité simple, qui est constituée par les groupes d'agent qui peuvent avoir les comportements spécifiques suivants [FMS+99] :

- *avancer en « formation »* : les agents humains marchent en groupe ; un mouvement de groupe cohérent est obtenu grâce à un ajustement des vitesses et une répartition spatiale

---

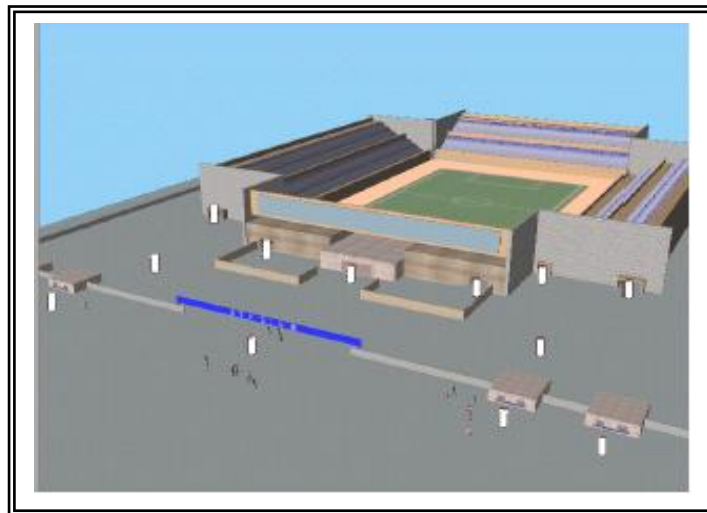
régulière des agents composant le groupe [Tho99] : c-à-d une formation pour atteindre un but ou un point d'intérêt (quand un but ou un point d'intérêt est partagé par beaucoup d'individus) [FMS+99].

- *Suivre* : un groupe peut suivre un autre groupe ou un individu.
- *Changer de but* : le comportement d'un groupe peut changer en fonction des relations entre individus [Tho99].
- *But de recherche* (les groupes ont un ou plusieurs buts à suivre)
- *S'assemblant le mouvement* (capacité de groupe de marcher ensemble).
- *Action d'éviter de collision*.
- *Action à exécuter* quand l'agent arrive à un but spécifique [BB+97].
- *Commande de groupe* (qui peut être autonome ou guidée) [FMS+99] ; Pour effectuer ces actions, le gestionnaire de l'environnement informé *CITY* fournit :
  1. les objets à éviter ; autrement dit la position et dimensions de chaque obstacle.
  2. les informations pour interagir avec les objets.
  3. des positions spécifiques dans l'environnement (les endroits physiques des buts ou des points d'intérêt).

Ces positions spécifiques sont stockées dans une liste et représentent des buts à atteindre pour le groupe. Il existe deux types de buts:

- **PI**, les points d'intérêt : ils sont extraits des listes de points d'entrée/sortie associées aux *ENVs*. Ce sont le plus souvent le milieu des contours des régions de circulation ou l'entrée d'espaces fermés.
- **PA**, les points d'action : une action est associée à un emplacement. Lorsqu'un groupe arrive à proximité d'un point d'action, la première étape est la distribution des agents autour du point, puis l'action associée à l'emplacement (une suite d'images clefs) est exécutée. Un exemple est un rassemblement autour d'un orateur perché sur un podium; la foule se rassemble autour de lui, écoute et applaudit.

Les chemins des groupes passent par des **PI** et des **PA** choisis aléatoirement dans les régions. Pour plus de réalisme sur les trajectoires entre deux points, le chemin est calculé par interpolation linéaire ou grâce à une courbe de **Bézier**. Chaque agent d'un groupe possède la même liste de **PI** et de **PA**; pour éviter qu'ils suivent tous les mêmes trajectoires, une courbe de **Bézier** est calculée pour chaque individu ; les points de contrôle de cette courbe sont générés aléatoirement dans la région à traverser. Chaque groupe possède son comportement spécifié par l'utilisateur ou par *CROWD*, les comportements individuels sont créés à partir de processus aléatoires. Le comportement individuel se décompose en trois volets : marcher, éviter les collisions et entretenir des relations avec les autres [MT97]. Pour plus de réalisme dans les comportements individuels, les individus sont dotés d'attributs « sociaux »: intérêt pour les **PA**, état émotionnel, niveau relationnel avec les autres et niveau de dominance. Ces attributs permettent de simuler les interactions des individus au sein d'un groupe et de faire évoluer leurs attributs en fonction des rencontres [Tho99].



**Figure 1.16:** Les points Internés et but pour conduire la foule

Nous pouvons voir sur la figure 1.16 quelques points d'intérêt (représentés par les cylindres blancs) dans la ville virtuelle et qui peut servir de buts aux différents groupes. Ces buts sont distribués pour que les différents groupes construisent le mouvement de foule.





**Figure 1.17:** Différents groupes qui entraînent dans un stade

La prochaine fois, le comportement de groupe est généré pour les foules autonomes ou directement pour la foule guidée, durant la simulation. Dans la figure 1.17 droite et gauche, on peut voir les différents groupes allant vers les différents emplacements donnant les différents comportements et buts.

#### 6.4 Analyse

Dans ce système, deux modules complémentaires ont plus particulièrement attirés notre attention : *CITY* et *CROWD*. L'existence de ces deux modules permet de simuler des comportements riches et temps-réel. En effet, le module *CITY* fournit au module *CROWD* les informations nécessaires à son comportement ; cette communication entre une base de données et un comportement est beaucoup moins coûteuse en temps d'exécution que la perception virtuelle. De plus, l'organisation de la base de données permet, en fonction de l'*ENV* d'évolution et des *ENVs* connexes, d'accéder directement aux informations pertinentes pour le comportement de la foule. Pour générer l'environnement informel, le concepteur urbain doit intégrer, durant la phase de modélisation, les informations de construction de cet environnement. Les auteurs reconnaissent qu'une reconstruction automatique à partir du traitement de la scène géométrique serait plus élégante qu'un processus de nommage des régions [FMS+99]. De plus, l'environnement urbain modélisé n'est pas complet ; aucune signalisation n'est présentée et l'environnement ne contient pas les informations nécessaires à la simulation de conducteurs. Cependant, l'objectif principal de ces travaux n'est pas de modéliser des environnements urbains réalistes, mais de montrer comment un environnement structuré et enrichi en informations symboliques et fonctionnelles permet d'obtenir des comportements réalistes et rapides en temps

d'exécution. Les résultats de leurs simulations dans des environnements complexes et fortement peuplés montrent que cet objectif est atteint (Figure 1.18).



**Figure 1.18:** Simulation d'une rame de métro à une heure de pointe

Le choix de modéliser des foules et non des individus est bien adapté à un environnement urbain où il est réalisé d'observer un trafic dense de piétons [MT97, MBC+98]. En termes de communication entre modules, il est plus économique de contrôler une foule que de simuler un grand nombre d'acteurs qui doivent communiquer et partager le même environnement [Tho99].

## 7. Conclusion

On a donné dans ce chapitre une définition d'un ensemble de six modules et l'interaction entre eux qui sont utilisés pour réaliser la simulation d'un tel environnement. Seulement deux modules nous ont intéressés: CITY et CROWD, CITY qui décrit l'environnement construit à partir de ses connaissances existant dans une base de données et CROWD qui simule le mouvement des humanoïdes dans cet environnement et leur interaction avec lui en accédant aux informations de la base de données.

Le prochain chapitre sera consacré aux différents concepts concernant l'animation comportementale des piétons, en passant par une introduction de différents modèles d'animation et en allant finalement vers une présentation du comportement piétonnier.

## Chapitre 2

# Animation comportementale des piétons

### 1. Introduction

Les piétons sont des humanoïdes, Le terme humanoïde signifie de "forme humaine", dans notre étude ces derniers sont également munis d'un comportement tendant à imiter celui de l'homme. L'humain virtuel doit aussi être capable de prendre des décisions relatives aux interactions disponibles dans l'environnement, qu'elles représentent ses objectifs à long terme ou bien un moyen de les atteindre. De plus, une certaine diversité de comportement doit être possible, afin de se rapprocher au maximum de situations concrètes.

On va présenter dans ce chapitre les différents concepts concernant l'animation tout en commençant par une première partie qui représente une définition d'une animation comportementale en décrivant les différents modèles qui la définissent.

Les modèles d'apparence et de capacités motrices sont utilisés pour mettre en mouvement les humanoïdes. Les deux autres modèles : sujets de notre travail représentant un modèle de perception et un modèle de décision qui définissent l'autonomie de l'humanoïde.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à l'animation comportementale des humanoïdes. On illustre les différents modèles d'animation, en focalisant sur le modèle comportemental.

Et enfin, on présente les deux comportements d'un piéton, les plus intéressants, pour en finir dans ce contexte.

### 2. L'animation comportementale : contexte et définition

Dans le cadre d'animations où l'on souhaite animer un grand nombre d'acteurs ou dans le domaine du jeu, il est intéressant de disposer de modèles d'humanoïdes autonomes et ((intelligents)). Un humanoïde possède des intentions et un comportement propre, d'où le terme animation comportementale utilisé dans le titre de ce chapitre [Tho99].

---

Le domaine de l'animation cherche à offrir des moyens de contrôle de plus en plus haut niveau permettant d'automatiser la génération d'animation réalistes. Les modèles d'animation peuvent se décliner en trois niveaux, en fonction de l'abstraction du contrôle qu'ils offrent [Arn94]:

1. **Les modèles descriptifs** ou guidés traduisent des effets, sans en connaître les causes, les animations peuvent être décrites image par image (de façon similaire aux dessins animés), en utilisant les méthodes mathématiques ou par des techniques de capture de mouvements.

2. **Les modèles générateurs** permettent la description des causes pour produire les effets. Leur but est de produire des animations réalistes au travers de la modélisation de systèmes mécaniques et de la résolution mathématique des forces qui leurs sont appliquées.

3. **Les modèles comportementaux** visent à simuler le comportement d'organismes vivants à l'intérieur de mondes virtuels. Il s'agit de laisser une ou plusieurs entités autonomes évoluer seules dans un environnement virtuel, plutôt que d'avoir à effectuer une description exhaustive de leurs animations dans le but de les rendre vivantes.

En ce sens, l'animation comportementale constitue le niveau le plus abstrait de contrôle en animation, elle cherche à offrir des outils et des concepts permettant de modéliser le comportement d'êtres virtuels. On va maintenant donner une définition du mot comportement.

### ✓ **Comportement**

Ensemble des manifestations objectives de l'activité d'un individu ou d'un animal. La psychologie du comportement écarte toute référence à la conscience et ne s'occupe que des relations qui existent entre les stimuli et les réponses de sujet. Cependant allant à l'encontre des théories mécanistes du behaviorisme, la psychologie contemporaine tend à élargir le concept de comportement pour y inclure les motivations de toute nature (affectives, sexuelles, sociales, etc.) propres aux conduites humaines.

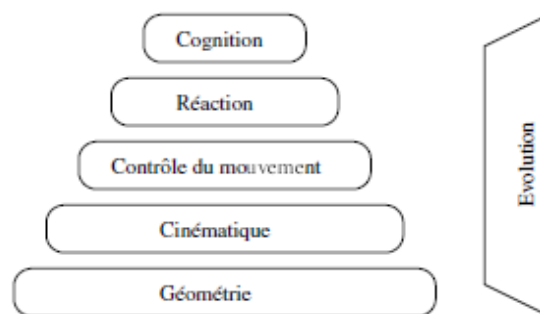
Le comportement est donc ce qui caractérise l'activité d'un individu ou d'un animal à l'intérieur d'un environnement, et se traduit par un certain nombre d'interactions. Cela souligne les deux concepts importants sous-jacents à l'animation comportementale : l'être vivant simulé est donc doté de ses propres moyens de perception et d'action, qui sont reliés par une composante décisionnelle. Son état interne et l'état perçu de l'environnement déterminent directement ou indirectement le comportement qu'il adopte [Lam03].

### 3. L'humanoïde virtuel autonome

Les humains virtuels (des agents virtuels, des agents, ou des acteurs virtuels) sont des humanoïdes dont les comportements sont inspirés par ceux des humains [MG94]. Ils peuvent être équipés de détecteurs, de mémoire, de perception, et du moteur comportemental qui leur permettent d'agir ou réagir aux événements. Ils peuvent également être beaucoup plus simples, guidés par des utilisateurs ou en interprétant des commandes prédéfinies [TMK99].

Dans le cadre de l'animation comportementale on a besoin d'outils et de modèles évolués de description du comportement.

L'animation d'un humanoïde de synthèse se décompose généralement en plusieurs niveaux: le niveau géométrique, le niveau cinématique, le niveau contrôle du mouvement, le niveau réactif et enfin le niveau cognitif (Figure 2.1) [Lam03]:



**Figure 2.1:** Pyramide de l'animation d'un humanoïde de synthèse

Le niveau géométrique fournit la représentation de l'humanoïde de synthèse dans l'environnement virtuel, qui se caractérise par un grand nombre de degrés de liberté. Les valeurs associées à ces degrés de liberté sont calculées dans la couche cinématique, en charge de la gestion de l'animation. La couche de contrôle du mouvement offre des interfaces de haut niveau permettant de spécifier les gestes qui doivent être effectués par l'humanoïde [Lam03].

Le niveau réactif définit des enchaînements d'actions atomiques permettant de traduire le comportement de l'humanoïde sous la forme de ses interactions avec l'environnement et effectue donc le lien avec l'animation, enfin le niveau cognitif symbolise les capacités de raisonnement dont l'humanoïde peut être doté, il est dépendant d'une représentation abstraite de l'environnement, qui lui permet de raisonner sur ses actions et leurs conséquences [Lam03].

---

L'animation comportementale donc offre des moyens de contrôle abstraits, permettant de décrire le comportement d'une entité autonome évoluant à l'intérieur d'un environnement virtuel.

## 4. Animation comportemental des humanoïdes

### 4.1 Animation des humanoïdes

L'animation comportementale vise à aborder une dimension nouvelle de l'animation par ordinateur : l'animation de scènes tridimensionnelles complexes en contexte multiacteurs. L'animation est constituée d'un ensemble d'objets dynamiques doués d'une certaine autonomie et dont les évolutions dépendent des interactions qui peuvent se produire sous des formes très variées. L'animation comportementale s'intéresse au comportement externe ou interne d'organismes vivants. Le but est de simuler toutes sortes d'individus vivants (plantes, animaux, et êtres humains) [Don04]. Les modèles comportementaux peuvent être classés en deux catégories:

- ✓ les modèles de transformation interne, provoquant des changements externes de l'objet (croissance de plantes ou modèle de muscle par exemple).
- ✓ les modèles d'animation externe, définissant le comportement extérieur d'un être, ses actions et ses réactions, de manière individuelle (animal, humain) ou collective (nuée d'oiseaux, banc de poissons, troupeau de mammifères, foules d'humanoïdes) [Don04].

L'humanoïde tel que nous l'entendons est défini par plusieurs modèles interdépendants se situant à différents niveaux d'abstraction. Le premier modèle fournit l'apparence de l'humanoïde, c'est le modèle géométrique. Ce modèle géométrique articulé est animé grâce à un modèle restituant les capacités motrices d'un humain (la marche, la préhension. etc.). Les capacités motrices sont quant à elles contrôlées par un modèle décisionnel. Ce modèle décisionnel couplé à un modèle de perception permet à un humanoïde de décider et de planifier ses actions en fonction de l'environnement dans lequel il évolue, de ses intentions, et quelquefois de son tempérament [Don04].

### 4.2 L'entité et son environnement

Dans un premier temps, de façon simplificatrice et abstraite, considérons l'être humain comme composé de capacités de perception, de traitement, d'action et de mémorisation. Il s'agit d'une vision simplificatrice mais néanmoins illustrative de l'architecture comportementale de

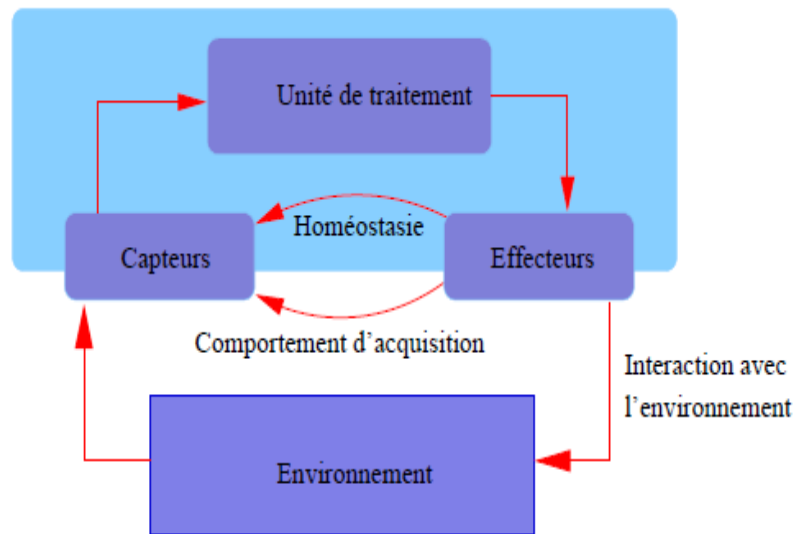
l'être humain [Don04]. Le mot comportement peut avoir plusieurs sens. Il peut vouloir signifier l'action complexe d'un humain ou d'un animal basé sur la volonté ou l'instinct. Il n'en demeure pas moins que la propriété principale qui fait de nous des êtres humains est notre capacité à raisonner. Cette capacité de raisonnement réside dans l'analyse et la réflexion. En effet tout être humain analyse via ces cinq sens le monde extérieur au sein duquel il évolue. Après analyse de cet environnement, la phase de réflexion entre en jeu afin de guider les décisions des être humains. Les sens informent le cerveau sur toutes les choses qui les entourent. La réflexion sur l'analyse des sens de l'être humain guide donc leurs décisions [Avr08]. Enfin, il est à même d'agir sur lui-même et sur son environnement.

L'homme à l'aide de ses cinq sens, peut percevoir et ressentir le monde dans lequel il évolue. La perception de cet environnement joue un rôle sur les différentes décisions prises par l'homme, ces décisions peuvent aussi entraîner une modification de cet environnement. Ces interactions avec son environnement nous amène à mettre en évidence plusieurs notions telles que la perception, la décision et l'action. Ce mécanisme de décision est un élément complexe permettant de régir le comportement humain. Selon plusieurs chercheurs ce mécanisme est hiérarchiquement ordonné [New90].

L'humain voit ce qui se passe autour de lui, décide de son action en fonction de sa perception et de ses connaissances, et agit sur lui-même et sur son environnement. L'organisme humain est en interaction constante avec son environnement par le biais de capteurs et d'effecteurs, comme l'illustre la figure 2.2 [Mal97].

Nous pouvons retrouver toutes ces différentes parties que sont les capteurs (sens), les effecteurs (membres), l'environnement et l'unité de traitement correspondant à la partie décisionnelle [Avr08]. Sur cette figure on peut voir plusieurs types de retour des effecteurs vers les capteurs:

- ✓ La boucle principale correspond à l'activité de l'individu sur son environnement.
- ✓ La deuxième boucle correspond au comportement d'acquisition. Par exemple, bouger sa tête pour mieux orienter ses oreilles afin d'entendre plus clairement un son: Partie du comportement utilisée pour améliorer la perception.
- ✓ La dernière boucle est celle de l'homéostasie, correspondant à la capacité de conservation de notre équilibre interne ("j'ai chaud, je transpire").



**Figure 2.2:** Boucle de rétroaction

Sur ces boucles de rétroaction, nous discernons parfaitement la séparation entre l'individu et l'environnement. Les seules interactions existantes entre les deux sont : nos capteurs qui nous rapportent l'information environnementale et les effecteurs qui agissent sur une petite partie de l'environnement. Nous possédons donc une certaine autonomie car à tout moment nous sommes capables d'analyser et de décider ou non de modifier l'environnement. Cette modification intervient après une étape clé du raisonnement humain : la prise de décision.

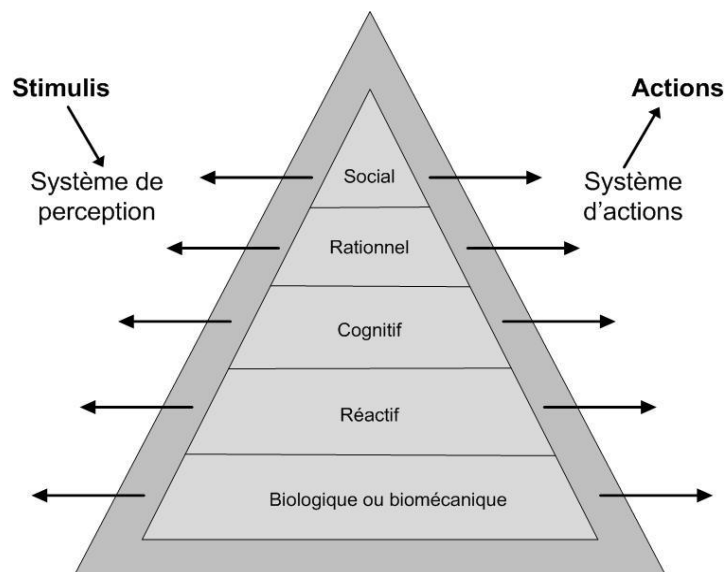
### 4.3 Principe de décision

**La décision** joue un rôle central, elle effectue une corrélation entre la perception et l'action. La perception alimente le processus décisionnel avec les informations abstraites issues des capteurs (ou sens) qui peuvent être mémorisés et /ou directement exploités. A partir de ces informations, la composante décisionnelle choisit une ou plusieurs actions à réaliser qui sont adaptées au contexte et aux motivations de l'individu [Lam03].

En fonction des informations perçues dans son environnement, l'être humain connaît les actions qu'il peut y effectuer. Désormais il doit en choisir une à réaliser et pour cela le raisonnement entre en jeu [Avr08]. Newell propose dans ses travaux sur l'analyse de l'architecture cognitive, un modèle hiérarchique à cinq niveaux [New90]. Dans cette représentation chaque niveau de raisonnement est caractérisé selon deux critères couplés : le temps de réalisation des différentes actions et la complexité. Ils possèdent chacun des relations



avec les niveaux supérieurs et inférieurs. La décomposition de Newel peut se représenter sous forme pyramidale et est définie comme suit (Figure 2.3):



**Figure 2.3:** Pyramide décisionnel

- **Le niveau biomécanique** : Il correspond aux fonctions de base, comme le mouvement des muscles. Il a des actions allant de 100  $\mu$ s à 10 ms.
- **Le niveau réactif** : Il concerne les comportements réflexes et ceux ne nécessitant pas de connaissance.
- **Le niveau cognitif** : Il représente les comportements utilisant la connaissance pour raisonner. Il peut être décomposé en plusieurs sous-niveaux :
  - *Action délibérée* permet de trancher entre une opération plutôt qu'une autre via les informations issues de l'environnement.
  - *Opération* permet d'effectuer des opérations élémentaires déjà existantes. Il permet d'obtenir des réponses rapides dans le cadre d'actions simples à effectuer en correspondance à des stimuli simples.
  - *Tâche unitaire* permet la composition d'opérations non élémentaires. Avec de l'entraînement, il est possible d'automatiser la composition de certaines opérations, cela permet de réduire le temps de réponse du système.
- **Le niveau rationnel** : Il définit les tâches à effectuer et les priorités entre celles-ci. Les actions peuvent aller d'une minute à plusieurs heures.

- **Le niveau social** : Il est le sommet de la pyramide, c'est donc le niveau dépendant de tous les autres niveaux, par conséquent le plus complexe. Il situe les êtres humains entre eux, d'un point de vue social et relationnel. Ses actions peuvent aller d'un jour à plusieurs semaines voire plusieurs mois.

Ce découpage, met en évidence deux caractéristiques du comportement : la réalisation des tâches simples, apprises et automatisées et la manipulation d'une symbolique associée au monde pour s'extraire d'un contexte donné et raisonner sur les connaissances des actions. [Lam03]. Dans notre sujet, nous nous intéressons par exemple aux règles sociales régissant le comportement des piétons [Tho99] telles les règles piétonnières jouant, par exemple, un rôle important dans les étapes de navigation en groupe.

#### 4.3.1 Modélisation du comportement réactif

Les comportements réactifs permettent de modéliser des tâches plus ou moins complexes, n'utilisant pas directement de modélisation de connaissances [Lam03].

Cette section présente différents systèmes mis en œuvre pour les modèles décisionnels. Il existe trois grandes catégories de modèle réactif : les systèmes stimuli-réponse, ceux à base de règles et ceux utilisant des automates [Avr08]. Ces derniers sont apparus dans le but de créer des comportements de plus en plus proches du comportement humain. Ils sont rapides et permettent de réagir rapidement aux changements environnementaux.

Les systèmes mentionnés ici sont étudiés à travers deux critères : la souplesse de définition et la richesse des comportements obtenus.

##### ✓ Systèmes stimuli-réponses

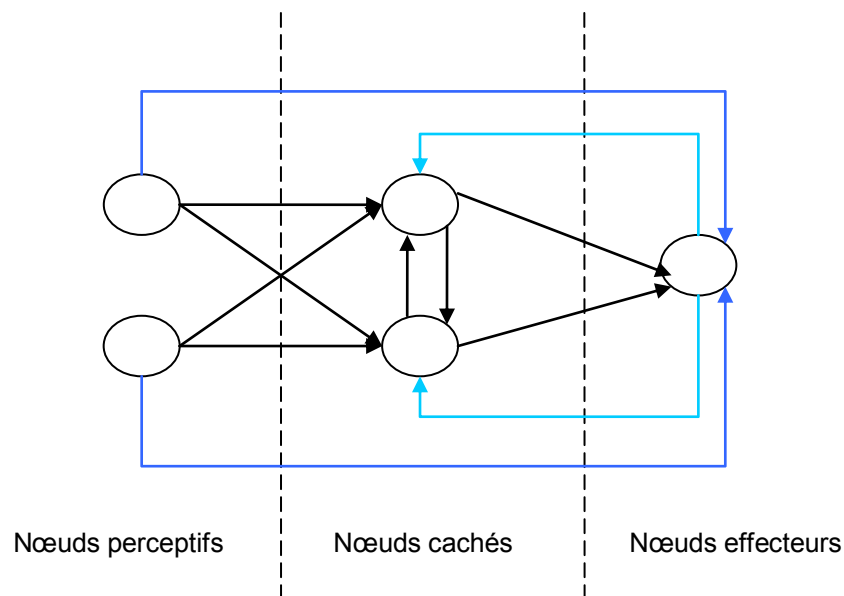
Issus des travaux développés en éthologie (comportement des animaux) [Bro91] dans lesquels les comportements résultent directement d'une série d'interactions avec l'environnement. Ce type de système est généralement représenté sous la forme d'un réseau de neurones [Lam03].

Leur principe se base sur l'interconnexion d'un grand nombre de neurones possédant des entrées et des sorties. Ces réseaux de neurones peuvent être représentés en couches avec ou non des boucles entre ces couches. L'entrée correspond à la perception et la sortie à l'action. En fonction des neurones "stimulés" par la perception de l'environnement, une réponse en sortie

détermine l'action à entreprendre. Ce système est fortement inspiré de l'étude biologique de l'homme.

Pour animer différents types de petits animaux lors de leurs déplacements, des réseaux de type SAN (sensor actuator networks) [Mor98] sont utilisés.

Les réseaux SAN sont des réseaux de neurones avec en entrée des capteurs binaires et en sortie des commandes pour les effecteurs [Mor98]. La figure 2.4 montre un exemple de tels réseaux, l'architecture se décompose en trois niveaux : les nœuds perceptifs (capteur), les nœuds cachés et les nœuds effecteurs, chaque nœud perceptif (capteur) est connecté à tous les nœuds cachés et effecteurs de réseau, alors que les nœuds effecteurs sont connectés uniquement au nœud caché [Lam03], les poids affectés aux connexions sont calculés automatiquement à l'aide d'un algorithme d'optimisation stochastique [Tho99].



**Figure 2.4 :** Les réseaux SAN

Pour simuler la circulation d'objets mobiles dans un environnement 3D, une approche réseau a été proposée SCA (Sense/Control/Action), les véhicules peuvent évoluer entre deux points tout en évitant les obstacles. Les capteurs fournissent au réseau la distance, aux objets et leur nature. Selon les informations captées, les nœuds du réseau contrôlent les effecteurs pour générer des comportements de répulsion ou d'attraction [Tho99].

Les approches de types stimulus-réponse sont particulièrement utiles pour programmer un comportement donné nécessitant beaucoup de réactivité. Elles permettent de prendre en compte très rapidement la dynamique de l'environnement et d'agir en fonction. Cependant, elles sont utilisées pour la réalisation de tâches spécifiques relativement peu complexe [Lam03]. La souplesse de modélisation des réseaux de neurones n'est pas très grande; la modification d'une réaction à un stimulus quelconque de l'environnement nécessite un recalcul complet des paramètres du réseau. L'approche stimulus-réponse se place à un niveau d'abstraction faible ; elle permet de modéliser des comportements réactifs de l'ordre de l'instinct.

L'approche à base de règles décrite maintenant est d'un niveau d'abstraction plus élevé, elle traite du comportement en termes de choix et de séquence des actions [Tho99].

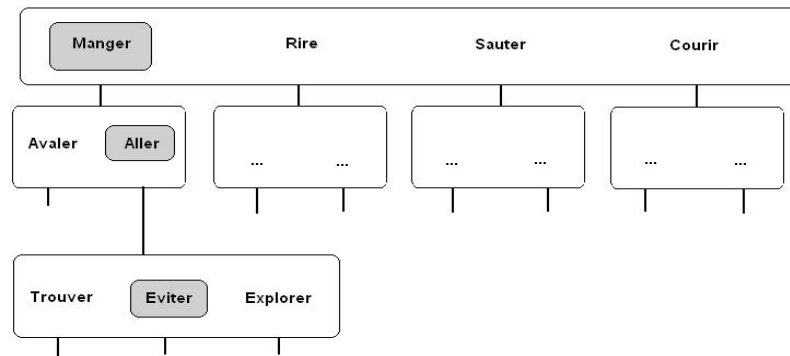
#### ✓ **Systèmes à base de règles**

Tout comme la précédente approche, les modèles basés règles vont traiter un ensemble de stimuli produits par différents capteurs. Ces règles peuvent être planes, représentant des comportements relativement indépendants, ou organisées hiérarchiquement, sous forme d'arbre, afin de gérer l'enchaînement des actions [Par07].

Une action satisfaisant les conditions de l'environnement courant sera choisie par l'application d'un algorithme de parcours d'arbre. Les comportements autorisés par cette approche sont d'un niveau d'abstraction plus élevé que l'approche précédente [BDD+03].

Afin d'éviter l'exécution de plusieurs règles au même moment il existe des méthodes de choix de règles, permettant ainsi d'éviter les conflits [Avr08]. En voici quelques exemples :

- ✓ Les systèmes à base de vote. Des modules ayant chacun un objectif distinct notent les différentes règles, la règle élue est celle la mieux notée [HK02].
- ✓ Les arbres de décision. Chaque action élémentaire est représentée par une feuille de l'arbre (Figure 2.5). Pour savoir laquelle est élue, le choix s'opère au sein des nœuds [Blu96].



**Figure 2.5:** Exemple d'arbre de décision

- ✓ Choix probabiliste de règles. En fonction de l'environnement dans lequel évolue l'humanoïde, les règles se voient attribuer une probabilité différente. L'état de l'humanoïde peut également être pris en compte pour l'attribution de cette probabilité [SGC04].

Les deux approches citées ci-dessus ont été utilisées pour animer des acteurs au comportement relativement simple. Les acteurs n'ont qu'une seule activité à la fois ; les interactions avec l'environnement sont limitées à l'évitement d'obstacles. Dans le but d'animer des acteurs possédant un comportement plus riche, des systèmes d'automates sont utilisés ; les caractéristiques communes de ces systèmes sont : réactivité, parallélisme et gestion du temps [Tho99].

#### ✓ **Systèmes à base d'automates**

Vouloir mener à bien une tâche précise consiste la plupart du temps à enchaîner plusieurs tâches unitaires afin d'y parvenir. Les approches à base d'automates se basent sur la forte expressivité procurée par les représentations en machines à états pour décrire finement les étapes et enchaînements d'actions d'un comportement. Ces approches sont les plus récentes pour simuler les comportements. Ainsi, chaque action d'un comportement sera représentée par un état de l'automate, tandis que les possibilités d'adaptation seront identifiées par les transitions. Du fait de sa souplesse d'utilisation, ce procédé s'est rapidement répandu dans la communauté informatique [Avr08].

Plusieurs méthodes utilisant ces automates ont déjà été mises en œuvre [Lam03].

### ✓ Les automates parallèles

Les PaT-Nets (Parallel Transition Networks) [BW95] permettent de décrire les comportements complexes sous la forme de plusieurs automates fonctionnant en parallèle, et ça permet de gérer plusieurs actions simultanées pour un humanoïde et donc d'augmenter le réalisme de la simulation. La communication entre automates est gérée par un système de messages [Lam03]. Les transitions entre état sont soit soumises à un système de priorité soit probabilistes.

### Les automates parallèles hiérarchiques

HCSM (Hierarchical Concurrent State Machines) [CKP95] est un système qui gère l'exécution d'automates en parallèle et qui ajoute la notion de hiérarchie. Chaque automate du système peut être vu comme une boîte noire possédant des flots en entrée et des flots en sortie et un système de messages lui permettant de communiquer avec d'autres automates. Chaque automate représente une fonction d'activité synthétisant des sorties à partir de ses entrées, de son état courant et des informations qu'il peut stocker en interne. Un automate, peut posséder, de manière transparente un certain nombre d'automates fils s'exécutant en parallèle de l'automate père. L'automate père joue le rôle de régulateur de la concurrence [Lam03].

### ✓ Les piles d'automates

Le système de pile d'automate [NT97] permet de modéliser le comportement d'un acteur réagissant à des événements extérieurs. En début de simulation, un certain nombre d'automates peuvent être empilés. Cette pile contient alors une suite d'actions à réaliser. Lorsqu'un automate se termine, l'automate en haut de pile est dépilé et rendu actif. Lors de la réception d'un événement extérieur ou sur demande de l'automate lui-même, un nouvel automate peut s'exécuter, provoquant l'interruption et l'empilement de l'automate courant [Lam03].

Nous avons présenté ici les trois principales approches permettant de gérer les comportements fondamentaux d'un individu. Nous pouvons retenir que dans le cadre d'un système qui se veut descriptif et contrôlable, seules les deux dernières approches peuvent présenter un intérêt, les réseaux de neurones étant trop difficiles à maintenir et interpréter.

Les avantages principaux de ces deux modèles sont les suivantes : pour les modèles basés règles, la grande facilité de mise en œuvre et d'extensibilité ; pour les modèles d'automates, la forte expressivité [Par07].

L'être humain étant doté de mécanismes de raisonnement, les systèmes purement réactifs ne sont pas suffisants pour décrire l'ensemble de ses comportements, il est nécessaire de prendre en compte les niveaux cognitifs et sociaux [Don00].

#### 4.3.2. Modélisation du comportement cognitif

Les systèmes purement réactifs ne sont pas suffisants pour décrire l'ensemble des comportements, notamment au niveau rationnel et sociaux. Il est ainsi nécessaire de décrire spécifiquement les comportements cognitifs. Les modèles cognitifs s'intéressent à la représentation des connaissances d'un acteur (croyances, intentions) [Don04], alors Le but est d'introduire la représentation des connaissances. Afin d'obtenir un comportement plausible de l'humanoïde, il est important qu'il puisse être en mesure de trouver seul des actions logiques lui permettant d'atteindre un but précis.

Il existe différents mécanismes permettant cet enchaînement présentés ci-dessous:

##### ✓ Les mécanismes de sélection d'action

Ce type de mécanisme possède deux objectifs principaux : Chercher une suite d'actions possibles pour atteindre le but fixé et saisir les opportunités qu'offre l'environnement.

##### ✓ La planification d'action

STRIPS et le calcul situationnel sont tous les deux des formalismes permettant l'analyse du monde et offrant ainsi un certain raisonnement sur les différents changements d'états de ce monde lors de l'exécution d'une action quelconque. Dans ce type de formalisme, l'environnement est décrit à l'aide de propriétés présentes ou non au sein de celui-ci. Pour cela, on utilise un langage de description des actions, celles-ci possèdent une pré-condition et plusieurs effets. Les effets découlant des pré-conditions se décomposent en deux listes : les propriétés à ajouter dans le monde où évolue l'humanoïde et les propriétés à supprimer de ce monde. Le calcul situationnel permet d'obtenir plusieurs effets différents d'une même action lorsque les conditions d'exécution varient, ce qui entraîne pour ce formalisme une algorithmique très complexe. A l'inverse les actions du STRIPS produisent toujours les mêmes effets, l'algorithmique qui en découle est donc plus simple.

Un langage de modélisation de la cognition (CML), fondé sur le calcul situationnel a été proposé. Avec ce modèle, il est possible de spécifier des buts à atteindre et de trouver une stratégie les satisfaisant, moyennant un temps de calcul assez important. Cette approche permet

---

de raisonner sur des actions représentées de manière abstraite et de leur effet sur le monde (ce qui nécessite de modéliser l'impact de chaque action sur le monde).

BCOOL (Behavioural and Cognitive Object Oriented Language) est un langage de description qui a pour objectif de modéliser la connaissance des agents, il permet de définir les relations qui peuvent exister entre les objets et les agents, s'inspirant des affordances, et des Smart Objects, il permet de décrire dans l'objet les comportements d'interaction possibles avec celui-ci. Ces possibilités d'interaction sont ensuite intégrées dans le modèle de raisonnement [BDD+03].

Des mécanismes de sélection d'actions ont été introduits pour gérer deux aspects du comportement : d'une part, la réactivité et donc la possibilité d'exploiter des opportunités offertes par l'environnement ; d'autre part, la recherche d'une suite d'actions permettant de satisfaire un but donné [Lam03]. Des extensions de l'algorithme ASM (Action Selection Mechanism) ont été proposées, comme les ASMs hiérarchique, qui s'intéressent à, (comment combiner), la réactivité et planification dans des applications temps réels, et aussi les PHISH-Nets, qui autorise l'utilisation d'un paramètre dans la description des actions. Le modèle BDI (Beliefs Desires Intentions), est un modèle formel qui inspire le mode de raisonnement du mode de l'être humain [Don00].

Les modèles décisionnels ont pour rôle de déclencher des actions de l'humanoïde en fonction d'informations issues de l'environnement et des intentions de l'humanoïde. Dans les exemples cités, on a vu que l'association de paramètres comportementaux à ces modèles (faim, prudence, agressivité) permet de générer des comportements variés pour un même modèle. Le niveau d'abstraction des informations extraites de l'environnement dépend du degré d'abstraction du modèle comportemental [Tho99]. Les approches automates fonctionnent avec des informations symboliques et structurées: nature des objets, événements. Ces informations sont extraites de l'environnement grâce à des mécanismes de perception qui sont maintenant décrits.

#### 4.4 Perception

Dans le cadre d'animations pré-définies, des trajectoires pré-calculées sont utilisées par les acteurs pour naviguer dans un environnement 3D. Par définition, ces animations manquent d'imprévu, les acteurs ne sont par exemple pas capables de réagir à d'autres acteurs. La solution est de doter les acteurs d'autonomie [Rey88]. Cette autonomie est possible si un flot d'information est créé entre l'environnement et l'acteur : c'est la perception [Tho99].



---

La perception est définie comme conscience des éléments de l'environnement par la sensation physique. Afin de mettre en application la perception, des humains virtuels devraient être équipés des sondes visuelles, tactiles et auditives. Ces sondes devraient être utilisées comme base pour mettre en application le comportement humain journalier tel que la locomotion visuellement dirigée, manipuler des objets, et répondre aux bruits et aux expressions. Une simulation de système émouvant devrait consister en détectant des contacts entre l'humain virtuel et l'environnement. Le sous-ensemble perceptuel le plus important est le système de vision [TMK99].

#### 4.4.1 Les canaux de perception

Il existe différents canaux de perception de l'environnement : le toucher, l'ouïe, la vue. La perception procède en deux étapes ; les capteurs détectent les objets à leur portée, puis les informations symboliques liées aux objets sont récupérées.

##### ✓ Capteurs

Les robots sont dotés de capteurs, de caméras et autres systèmes qui leur permettent de reconstruire l'environnement dans lequel ils circulent [RTJ89]. Des techniques d'analyse et de traitement d'images ont été utilisées dans le domaine de l'animation comportementale pour simuler la vision des entités. C'est ce qu'on appelle la vision synthétique [RMT90]. En utilisant les cartes graphiques des ordinateurs, une description des objets 3D est fournie à l'acteur synthétique à partir d'un point de vue (l'œil) et des centres d'intérêt de l'acteur synthétique.

##### ✓ Accès direct à la base de données

[TT94] anime des poissons autonomes dont le comportement dépend de leur perception. Pour les comportements réflexes tel l'évitement d'obstacles, la perception et l'action sont intrinsèquement liées. La perception visuelle s'effectue dans un angle solide de 300 sur 300 degrés ; les informations récupérées sont: Sensations lumineuses, Distance aux objets, Couleur, taille et identification des objets.

Seules les informations nécessaires sont captées. La vision consiste à interroger directement la base de données pour identifier les objets proches et les modèles physiques pour obtenir la vitesse des objets. Ils peuvent en plus sentir la température de l'eau.

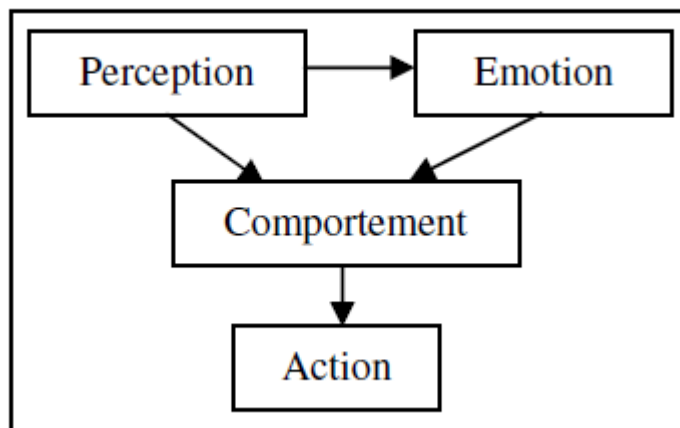
En réalité virtuelle, le problème de perception est plus simple à résoudre qu'en robotique. En effet, la géométrie de l'environnement est parfaitement connue, elle est stockée dans une structure permettant de distinguer les objets les uns des autres et de leur associer des informations symboliques, qui aident l'humanoïde dans sa tâche de décision [Tho99], donc le but de la perception n'est pas de fournir la description générale d'une scène mais d'extraire une information spécifique pour la tâche impliquée dans l'activité en cours [War95].

#### 4.4.2 Interprétation des données et connaissance

Une approche a été proposée, c'est l'approche écologique de la perception : une théorie qui associe une sémantique en terme de comportements à chaque objet de l'environnement [BDD+03], ce dernier offre à l'agent en mouvement des significations directement utiles pour l'action, des « disponibilités physiques perceptibles », appelés les « affordances » [Tho99]. Le concept d'affordance qualifie une relation entre un organisme et une façon d'agir appropriée à la fois aux opportunités offertes par l'environnement et au potentiel de l'acteur [RQ98], par exemple : un objet est susceptible d'être attrapé, un endroit peut constituer une bonne cachette, un événement peut causer un envol ou une approche [Tho99]. L'accent est mis non pas sur la nature de l'« observé » mais sur la nature de l'« observateur » qui va tout de suite accéder aux caractéristiques de l'objet qui l'intéresse. Ainsi, un environnement va fournir directement à l'entité comportementale l'ensemble des comportements possibles vis-à-vis des objets qui le constituent [BDD+03]. Plusieurs processus de perception sont utilisés en animation comportementale, nous citons :

- ✓ *Circulation comportementale.* L'acteur décide de son mouvement en fonction de sa perception et de ses motivations. Le recueil d'informations est effectué en deux étapes : capture (par lancer de rayon) et évaluation. Le but de la perception n'est pas de fournir la description générale d'une scène mais d'extraire une information spécifique pour la tâche impliquée dans l'activité en cours. Pour l'activité de navigation dans un environnement 3D, la perception permet de : détecter les segments occlusifs et les coins concaves, détecter les collisions, déterminer les affordances ; en d'autres termes les ressources de l'environnement [Tho99].
- ✓ *Stratégie de perception.* Ici on s'intéresse aux comportements d'attention visuelle qui dépendent de l'activité de l'acteur et contrôlent le mouvement des yeux et de la tête. [Tho99].

- ✓ *L'émotion.* L'émotion peut être considérée comme un filtre entre la perception et l'action [BT98] (Figure 1.6). La réaction des acteurs aux événements extérieurs dépend de leur tempérament. Les émotions sont définies par des conditions d'émergence (quand et comment). L'émotion peut être définie comme l'aspect affectif de la conscience : Un état de sentiment, une réaction psychique et physique (comme la colère ou la crainte), subjectivement expérimenté comme un sentiment fort et physiologiquement qui augmente les changements préparant le corps pour une action vigoureuse immédiate [BT98]. Les acteurs doivent être capables de répondre, avec émotion à leur situation et agissant physiquement à cela. Les émotions visibles fournissent des designers avec un moyen direct pour affecter à l'utilisateur un état émotionnel propre à lui. Les acteurs sont donc équipés d'un modèle informatique simple de comportement émotionnel, qui est lié au comportement comme les expressions de visage qui peuvent être employées pour influencer leurs actions [Tho99].



**Figure 2.6:** Structure du modèle comportementale

Dans le cadre de ce travail, les humanoïdes sont des piétons évoluant dans une ville virtuelle, le comportement du piéton est guidé par des règles sociales et le code de la route. Le raisonnement mené est donc d'un niveau d'abstraction élevé, il sera donc nécessaire de disposer d'un modèle d'environnement structuré et riche en informations symboliques. Afin de connaître le comportement du piéton dans la ville, une étude bibliographique sur la psychologie du comportement a été menée.

## 5. Comportement du piéton

Les recherches sur le comportement du piéton ont pour but l'étude de son mode de réaction, de la manière dont il appréhende l'environnement et des variables qui pondèrent ses réactions. Les piétons sont le plus souvent observés lorsqu'ils suivent une voie ou qu'ils traversent une chaussée. L'activité du piéton est répartie en quatre tâches : perception, décision, action et communication. Les psychologues et les sociologues observent le comportement de perception et d'action des piétons. Ces observations permettent d'inférer sur le fonctionnement des autres activités (décision et communication) [Tho99].

La locomotion est un des comportements humains les plus fondamentaux et qui joue un rôle central dans un certain nombre d'activités humaines. Afin d'être adaptatif, il doit être guidé par des informations sur l'environnement et ainsi le contrôle visuel de la locomotion est une capacité perceptuelle fondamentale. Le suivi de voie est une activité prépondérante tant pour le piéton que pour le conducteur de véhicule. Dans cette activité, l'entrée principale concerne la forme de la voie, ce qui correspond à son squelette et sa largeur [Don04].

### 5.1 Le suivi de voie

Le suivi de voie (trottoir, tapis roulant, couloir) est prépondérant dans l'activité du piéton. Lors du suivi de voie, l'essentiel de l'activité de décision du piéton porte sur l'évitement. Les règles d'évitement sont sociales et culturelles [Tho99]. Goffman décrit les techniques qu'emploie un piéton dans le but d'éviter les collisions avec d'autres usagers de la voirie et appelle cela le code social de la route. [BDD+03]

Une voie est définie par deux paramètres : un squelette donnant une direction privilégiée de circulation, et une largeur associée (Figure 2.7).

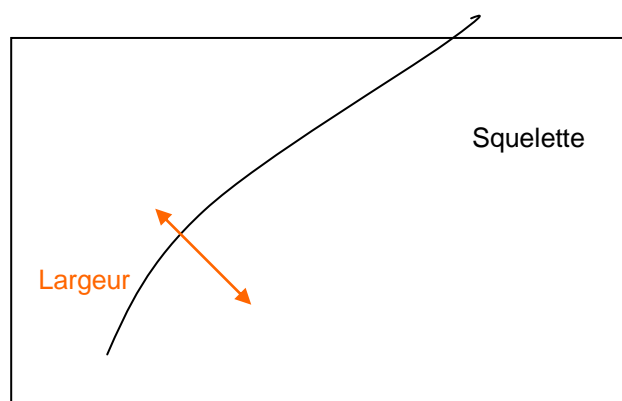


Figure 2.7: Définition d'une voie

Pour respecter des normes de sécurité, les urbanistes et les architectes utilisent des simulations macroscopiques pour déterminer la largeur minimale d'un trottoir ou d'un couloir.

L'observation de la gestion de l'espace par les piétons fournit des résultats numériques précis et directement intégrables comme paramètres de décision du piéton synthétique :

- ✓ Pour se croiser, deux piétons sont à l'aise sur un trottoir de deux mètres de large.
- ✓ Les piétons descendent sur la chaussée lorsque la densité dépasse 1 piéton/m<sup>2</sup>.

[Tho99]

Goffman décrit les techniques qu'emploie un piéton dans le but d'éviter les collisions avec d'autres usagers de la voirie et appelle cela le code social de la route. Le lien social entre passants est caractérisé par le silence et l'indifférence. Pour maintenir ce lien d'indifférence civile entre passants, plusieurs comportements sont mis en œuvre [Don04]:

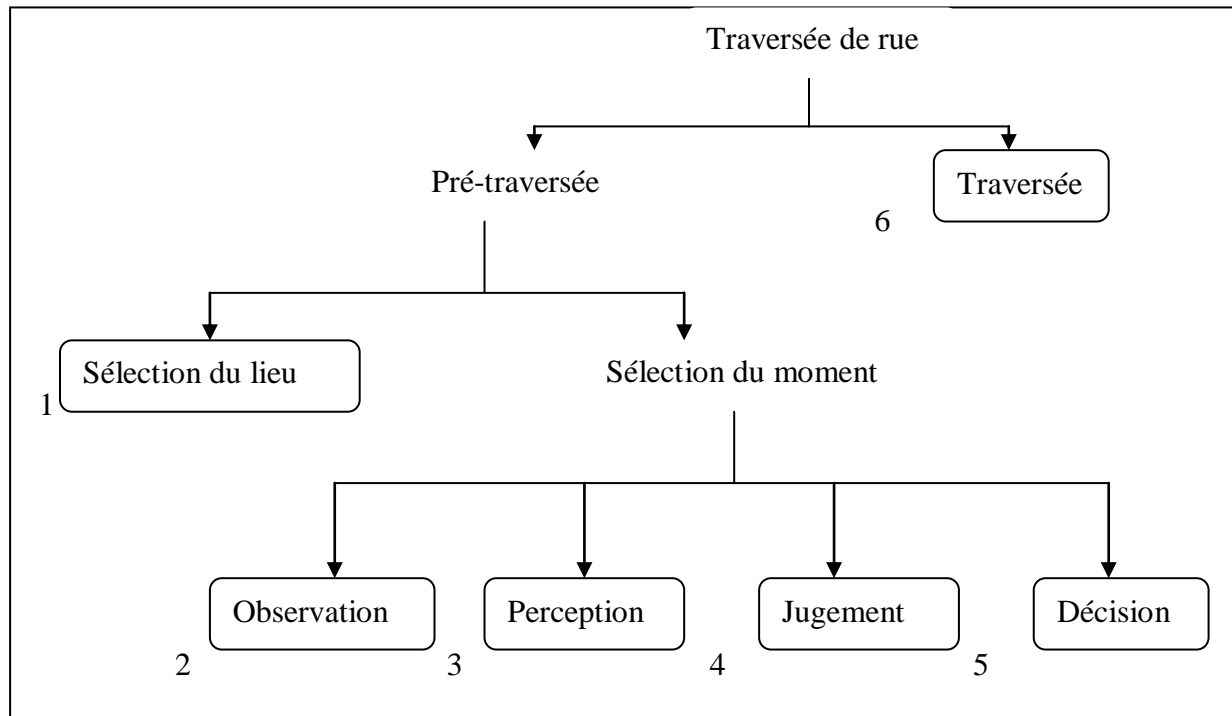
- ✓ Le premier comportement, appelé externalisation, exprime le fait que les gens soit constamment en train de fournir des informations sur leurs intentions (direction, vitesse et résolution du pas) par des mouvements pouvant émaner de tout ou partie du corps. Chaque piéton se doit de rendre ces informations perceptibles aux autres personnes occupant la zone d'interaction, (perceptible sur la base d'un simple coup d'œil).
- ✓ Le second comportement appelé scrutation est un processus par lequel chaque piéton regroupe de manière sélective un ensemble d'informations externalisés par d'autres piétons.
- ✓ Le troisième comportement, appelé minimisation des ajustements exprime le fait que l'ajustement de la trajectoire est effectué à une distance de quelques mètres pour être rendu perceptible assez tôt par les autres, dans le but de minimiser l'interaction avec les autres usagers et d'éviter une coordination [BDD+03].

## 5.2 La traversée de rue

L'activité de traversée de rue, très largement étudiée, est dangereuse pour le piéton qui se retrouve hors de son territoire réservé. Sur la chaussée comme sur le trottoir une communication fondée sur des coups d'œil s'instaure entre les usagers. Lors de la traversée, la communication entre le piéton et les conducteurs ainsi que l'évaluation des situations influencent les décisions du piéton [Tho99].

### 5.2.1 Étapes de la traversée

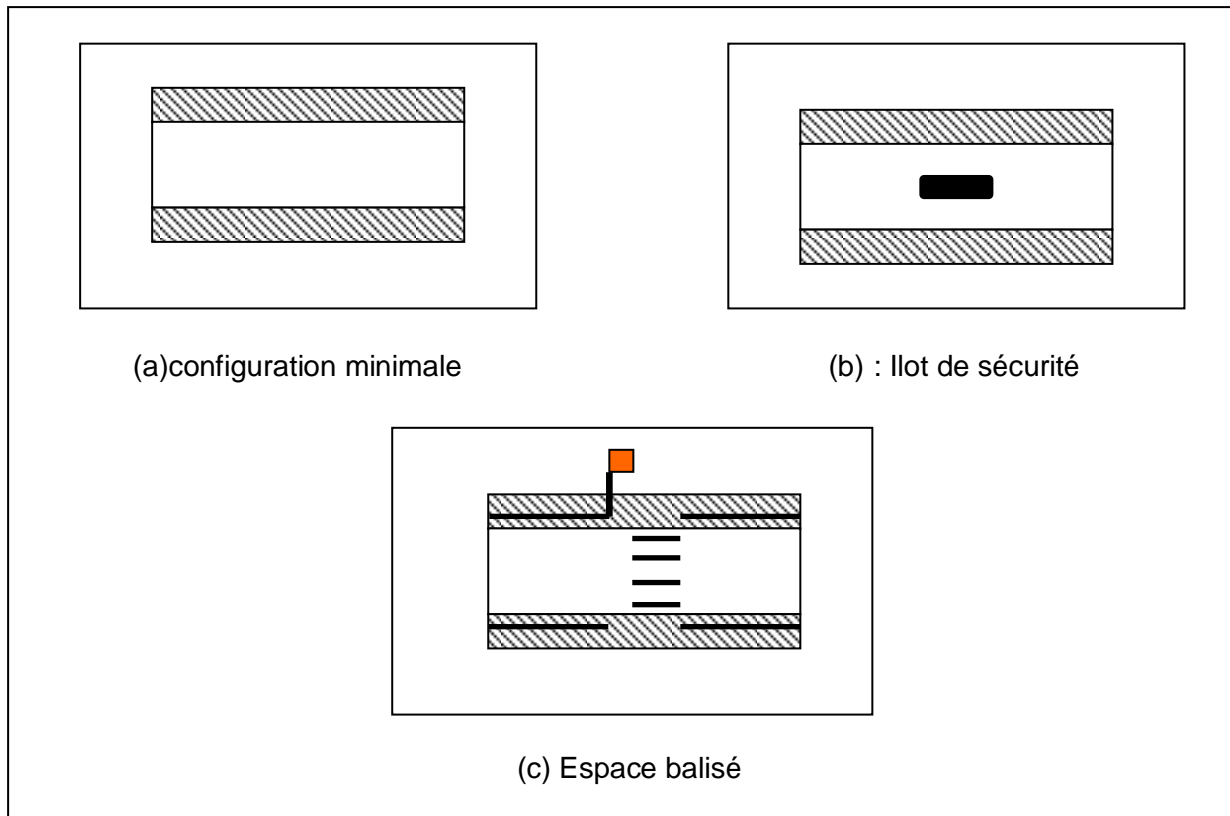
Six étapes de décomposer la traversés de rue sont proposées par Firth [Fir82] qui donne une description systématique du comportement en terme d'actions et de paramètres observables : s'arrêter avant de traverser, mouvement de la tête, vitesse de marche : (Figure2.8).



**Figure 2.8 :** Étapes de la traversée de rue

La première étape est la sélection du lieu, ce lieu est le bord du trottoir. On peut distinguer trois configurations pour les traversées qui sont illustré dans la figure 2.9.

La première configuration (figure2.9 (a)) est la plus dangereuse pour le piéton, puisque aucun espace ne lui est réservé. Dans la deuxième configuration (figure2.9 (b)), un îlot permet au piéton de découper la tâche de traversée en deux étapes. Dans la dernière configuration (figure2.9 (c)), le comportement du piéton est complètement guidé, c'est un comportement routier. Le piéton doit s'arrêter au feu et ensuite traverser. Les étapes de la pré-traversée sont les sélections du lieu et du moment, elles ne sont pas forcément séquentielles [Tho99].



**Figure 2.9:** La traversée (configurations spatiales)

L'étude du processus de sélection du moment permet d'extraire les facteurs comportementaux qui participent à ces différences de comportement lors de la traversée.

Quatre étapes participent à la sélection du moment :

**1. Observation** : mouvements de tête pour regarder. L'observation est délibérée lorsque les feux prennent le relais de l'information.

**2. Perception** : est une conséquence de l'observation. L'observation est un événement patent, alors que la perception est un événement caché. Dans cette phase, les informations visuelles et auditives sont intégrées. Cette phase étant cachée il est difficile de l'analyser. Par contre, on connaît les résultats d'une mauvaise perception; par exemple, lorsqu'un accident survient parce qu'un enfant a « regardé », mais n'a pas « vu » le véhicule. Les enfants prennent plus de temps que les adultes pour distinguer les informations pertinentes.

**3. Jugement** : c'est une étape supplémentaire à la perception dans le traitement de l'information. L'information est organisée sous une forme qui permet au piéton de prendre la décision de traverser. La vitesse des véhicules et leur distance au piéton sont jugées. La variété des

comportements provient d'une mauvaise estimation des vitesses et des distances. Par exemple, les filles sont plus prudentes car elles surestiment les vitesses et analysent plus correctement les vitesses élevées.

**4. Décision** : si on ne traverse pas, tout le processus recommence et la traversée s'amorce à un autre endroit. La décision est fondée sur la connaissance, l'éducation et le raisonnement logique [Tho99].

### 5.2.2 Traversée et risque

Prendre un risque c'est s'exposer à un danger que l'on peut plus ou moins prévoir. Dans le cadre de la traversée, le danger pour le piéton est de se faire renverser par une voiture. Ce risque est bien sur moins élevé lorsque le piéton traverse sur le passage piéton ; le risque n'est cependant pas nul. Des études ont montré que le piéton est prioritaire lorsqu'il est sur le passage piéton, mais avant de s'engager sur le passage, il doit s'assurer que les véhicules arrivant de son côté ont le temps de freiner pour le laisser passer. La prise de risque chez le piéton peut être délibérée ou provenir d'une erreur de jugement [Tho99].

Les comportements de traversée sont différents lorsqu'une communication s'instaure entre les usagers. Relieu [RQ98] propose une décomposition en trois étapes de cette communication. La communication s'instaure lorsqu'un des participants, piéton ou conducteur, voit que l'autre est sur le point de lui obstruer le passage.

1. Le premier moment correspond à la perception mutuelle du piéton et de l'automobiliste. Une façon usuelle de se montrer qu'ils se sont vus est de diminuer leur allure ; ils sont alors prêts pour résoudre un problème de coordination.

2. Le deuxième moment est occupé en règle générale par une modification de l'allure de l'un ou l'autre, qui génère une ouverture perceptible dans laquelle le second s'engouffre aussitôt.

3. Le troisième moment consiste en une vérification que la communication est bien passée. Un piéton qui accélère son allure pour passer regarde l'automobiliste en marchant, de manière à vérifier qu'il continue à ralentir.

Ces trois étapes peuvent constituer la base d'un algorithme de communication fournissant les informations nécessaires à la décision de traversée et d'allure du piéton.



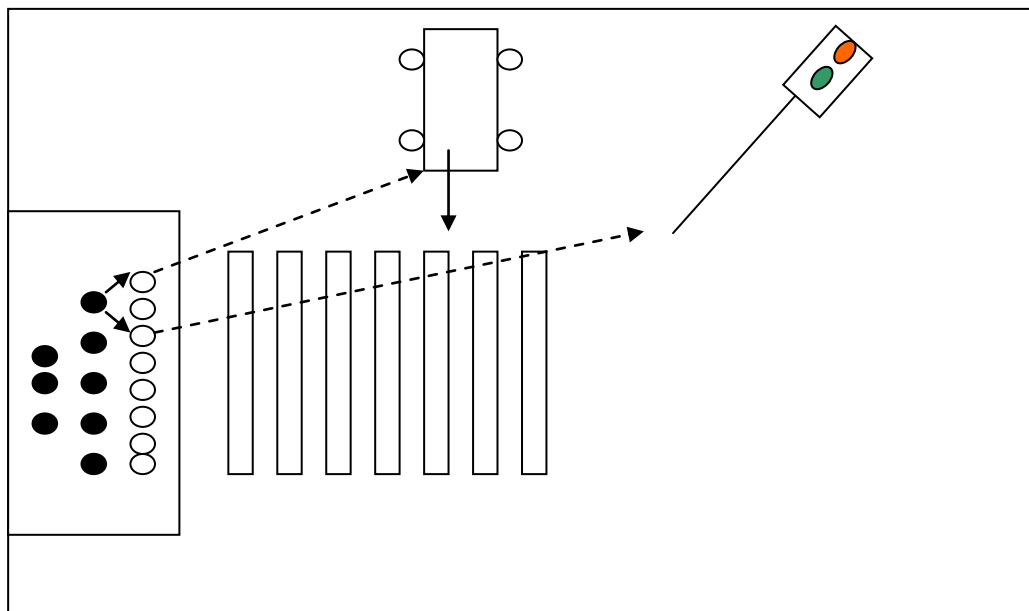
### 5.2.3 Traversée en groupe

Les piétons sont rarement seuls ; ils sont toujours entourés d'une grande quantité d'anonymes. A partir d'une analyse faite sur un carrefour au trafic dense (Chicago), Trois configurations sont distinguées :

**1. Le nouveau venu** : s'il y a déjà des gens sur le passage piéton le nouveau venu s'y engagera ; les étapes de sélection du moment décrites précédemment disparaissent au profit de la confiance dans le jugement des autres.

**2. « Ligne de front » et « arrière garde »** : la répartition des tâches de surveillance est automatique : certains regardent les signalisations, d'autres, les voitures et d'autres observent ceux qui sont devant eux (figure 2.10). Les piétons de la « ligne de front » se répartissent équitablement la surveillance des feux et du trafic. Les piétons de l'« arrière garde » se contentent de faire confiance aux décisions prises par ceux qui sont devant eux.

**3. Le piéton solitaire**: gère seul toutes les étapes d'observation, de jugement et de décision. Son regard alterne entre les feux et la circulation, si d'autres piétons surgissent, il observera aussi leur comportement [Tho99].



**Figure 2.10** : Répartition des tâches d'observation avant la traversée de chaussée

## 6. Comportement de foules

Dans les mouvements de foules, les flux de piétons marchant dans des directions opposées ont tendance à se séparer, conduisant ainsi à la formation dynamique de files de piétons allant dans la même direction. Dans les situations de panique, les piétons souhaitent se déplacer beaucoup plus vite que d'habitude et de ce fait vont jusqu'au contact physique avec les autres. Turner [Tur84] utilise une théorie des normes pour suggérer que l'homogénéité se développe dans une foule non pas parce que des personnes ayant les mêmes prédispositions se sont assemblées spatialement, mais parce que les membres de la foule ont tendance à se conformer à une norme émergente. Selon Yamori [Yam98], cette notion de norme est accompagnée inévitablement de la notion de régulation, comportement qui n'est pas inné mais acquis comme élément normatif au sein d'une certaine macrostructure ou collectivité. Cependant, de petits groupes peuvent servir de levier pour faire bouger de plus grandes unités, jouant ainsi le rôle du cœur.

Boles [Blo81] a observé des structures de bandes au sein des foules de piétons se déplaçant sur des trottoirs et il a montré que les piétons avaient tendance à utiliser ce type de structure afin de maintenir le maximum d'efficacité au sein du trafic piétonnier. Milgram et Toch ont noté qu'une structure en anneau émergeait lorsque les membres d'une foule disposaient d'un point d'intérêt unique commun. Cette formation circulaire peut être observée au sein des foules regroupées par exemple autour d'artistes de rue. Un des problèmes cruciaux mis en avant par Yamori [Yam 98] concerne les relations entre les comportements micro et macroscopiques au sein d'une foule. L'enjeu est d'expliquer comment un individu peut affecter une collectivité et comment en retour la collectivité va agir sur le comportement individuel au cours du temps. Yamori se focalise sur l'étude de la formation des structures de bandes macroscopiques sur des passages-piétons dans un cas de trafic piétonnier très dense comme c'est le cas au Japon. De l'étude, il postule qu'une masse critique doit être atteinte afin qu'émerge une structure en forme de bandes.

## **7. Conclusion**

La simulation de piétons ayant des comportements proches de ceux décrits par les psychologues et les sociologues, n'est possible que si l'environnement géométrique et la base de données fournissent les informations nécessaires à la construction de jugements permettant au piéton synthétique de décider et d'agir. Les humanoïdes se doivent de posséder tant des niveaux d'abstraction cognitifs que réactifs. La conjugaison de ces niveaux augmente ainsi de façon notoire leur autonomie dans l'environnement.

On a défini dans ce chapitre les différents concepts concernant l'animation comportementale des piétons, en passant ensuite, par une introduction de différents modèles d'animation et en allant, finalement vers une présentation du comportement piétonnier.

Le chapitre suivant va nous permettre de présenter quelques notions sur la navigation d'un piéton dans un environnement urbain.

## Chapitre 3

# Navigation d'humanoïdes

### 1. Introduction

La possibilité de se déplacer est la condition première de l'autonomie, le déplacement permet d'appréhender l'environnement, de se placer pour mieux percevoir et donc, indirectement, de mieux comprendre les mécanismes qui régissent le monde, Dans ce chapitre, nous allons nous focaliser sur le comportement de navigation entre deux points de l'environnement avec évitement d'obstacles.

L'humanoïde a besoin d'une structure de données représentant l'environnement, qui lui permet de détecter rapidement les obstacles statiques (structure de l'environnement) et dynamique (les autres humanoïdes), on a donc deux problèmes de détection de collision: l'un statique, inhérent à la structure de l'environnement, l'autre dynamique, dépendant des autres humanoïdes en déplacement.

Dans ce chapitre on va définir la représentation mentale de l'environnement, nous continuerons ensuite avec un certain nombre de modèles statistiques qui ont répertorié et classifié des données concernant les flux de personnes, puis un procédé de planification de chemin. Dans la continuité, nous étudierons les modèles de comportement généralement utilisés pour calculer ces chemins.

### 2. Le comportement de navigation piétonnier

Les premières études s'étant intéressées à la caractérisation du comportement de navigation piétonnier furent réalisées par les psychologues et autres sociologues. Ceux-ci, se basant sur une observation du réel, ont distingué certains comportements récurrents, allant même parfois jusqu'à proposer des modèles les explicitant [Par07].

## 2.1 Représentation mentale de l'environnement de navigation

L'être humain a besoin de représenter l'environnement pour pouvoir se déplacer. Cette représentation mentale va en effet lui servir à raisonner sur cet environnement, que ce soit pour évaluer un chemin afin d'atteindre une localisation précise, ou encore pour organiser les tâches qu'il doit effectuer (comme les interactions avec des objets) [Par07].

La représentation mentale, permet à un être humain de se repérer dans l'environnement. Elle passe par une phase d'abstraction, c'est-à-dire une interprétation personnelle de la géométrie des lieux. Une telle abstraction, dénommée carte cognitive spatiale, est basée sur deux concepts. Premièrement, l'élaboration d'une carte sous-entend une construction mentale durable, faisant intervenir des processus mémoriels permettant une conservation de l'information au cours du temps. Deuxièmement, le recours à un mécanisme cognitif signifie que cette représentation est obtenue par un procédé actif, réfléchi, de l'être humain, celui-ci raisonnant sur ce qu'il perçoit de son environnement pour l'organiser [Par07].

L'abstraction mentale d'un environnement peut être vue comme un système de filtrage, où l'être humain ne va pas stocker l'ensemble de la géographie perçue, mais plutôt en extraire des lieux marquants. Ces zones d'intérêt sont des endroits dont la localisation est mieux connue, et serviront ensuite de point de repère à d'autres lieux adjacents. Waller et al [WL+02] indiquent que ces lieux marquant, une fois associés entre eux, forment une mémoire spatiale impliquée dans plusieurs tâches mentales. Tout d'abord l'être humain extrait des lieux marquants, puis des chemins, et enfin une organisation topographique des lieux [Par07].

## 2.2 Processus mentaux de navigation

Une fois que l'être humain dispose d'une représentation mentale de son environnement, il peut l'exploiter afin d'organiser son déplacement. S.Paris [Par07] a scindé les processus mentaux dans sa thèse en trois groupes principaux :

1. Raisonnement spatial, où l'individu va associer les tâches qu'il doit effectuer avec leur localisation, puis procéder à une sélection.

2. Planification d'un chemin, permettant à l'individu d'évaluer son déplacement au sein de l'environnement jusqu'à la tâche sélectionnée, et donc de se projeter dans le temps et l'espace.

3. Navigation et locomotion, qui vont gérer le déplacement local d'un individu tout au long du chemin planifié.

#### ✓ **Planification d'un chemin**

La planification de chemin consiste à lister les lieux par lesquels passer pour relier la position courante d'un humain à sa destination. Ce processus mental est bien entendu très fortement lié à la représentation mentale de l'espace.

D'autres informations peuvent tout de même intervenir dans ce processus. Par exemple, Tom A. et Denis M. [TD03] ont étudié les degrés d'utilisation des lieux marquant et des noms de rues dans la planification de chemin. Ils indiquent que, du fait de leur plus faible corrélation à la topographie, les noms de rues sont beaucoup moins utilisés.

Nous avons présenté dans le premier chapitre les différentes manières de représenter les parties statiques d'un environnement, les calculs de chemin se font sur ces représentations. Il existe pour cela différents méthodes plus ou moins classique telles que le parcours de graphe ou la descente de gradient pour les champs de potentiels. Le but des algorithmes de parcours de graphe est la minimisation du coût pour extraire le plus court chemin. Il existe plusieurs algorithmes tels que l'algorithme de Dijkstra permettant de trouver l'ensemble des meilleurs chemins entre deux nœuds d'un graphe.

L'algorithme A\* est très utilisé dans les jeux-vidéos, il est similaire à celui de Dijkstra mais ajoute un coût prédictif aux nœuds correspondant au reste du chemin à parcourir. Plusieurs évolutions de A\* ont été ensuite proposées tels que IDA\* ou HPA\*. Le coût des algorithmes présentés ci-dessus peut être évalué selon plusieurs critères tels que la distance entre les nœuds, des changements de direction ou même la congestion d'une zone de l'environnement [ST07].

#### ✓ **Locomotion**

La locomotion est le comportement humain permettant le déplacement de l'individu au sein de l'environnement, jouant de ce fait un rôle central dans de nombreuses activités. Celui-ci se doit d'être grandement adaptatif, notamment du fait de sa gestion de l'évitement de collision avec d'autres entités présentes dans l'environnement. Goffman E. [Gof71] énonce que trois comportements sont mis en œuvre lors de la locomotion:

**L'externalisation** est le processus par lequel les gens fournissent constamment des informations sur leurs intentions de déplacement, que ce soit la direction, la vitesse, ou encore la

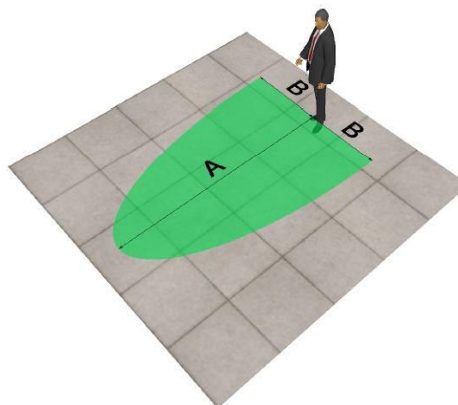
longueur de pas. Cette transmission se fait par des successions de mouvements corporels, devant être perceptibles par l'entourage du piéton.

**La scrutation** est le processus complémentaire à l'externalisation. Celui-ci permet à un piéton de regrouper sélectivement les informations émises par son entourage.

**La minimisation** des ajustements signale que le piéton réduit l'amplitude et le nombre de changements d'orientation au cours de son trajet. Cela implique une anticipation dans la modification des trajectoires, afin de la rendre perceptible assez tôt par l'entourage, dans le but d'éviter une coordination ainsi qu'une interaction proche.

Concernant l'interaction locale lors de la locomotion, E.Goffman introduit la région ovale de sécurité (Figure 3.1), cet espace vital est une zone entourant l'être humain au sein de laquelle ce dernier ne souhaite y voir aucun autre être humain. Il varie en fonction de plusieurs paramètres comme le degré d'affinité avec certaines personnes. F.Feurtey [Feu00] nous présente un tableau sur les dimensions de cet espace vital en fonction de notre degré d'affinité du très intime au totalement inconnu. Comme le décrit C.Reynolds [Rey00], cet espace varie également en fonction de la vitesse adoptée. Cette déformation a pour but de créer une certaine zone d'anticipation devant l'entité modélisée (A sur la figure, B correspondant à la distance latérale de sécurité).

De manière plus générale, M. Relieu et L. Quéré [RQ98] énonce le principe de discrimination urbaine, signalant que le piéton focalise son attention à l'intérieur de sa région courante pour en extraire une information pertinente.



**Figure 3.1:** Aire de Goffman(en vert)

### 3. Les bases de la navigation

L'une des aptitudes que possède l'être humain et bon nombre d'animaux est la capacité à se déplacer au sein de leur environnement. Ce déplacement plus communément appelé navigation chez l'homme est régi par des codes, tels que le fait de prendre en compte géométriquement son environnement. Cette prise en compte permet ainsi à l'homme de s'adapter aux différentes contraintes que lui impose son environnement. L'humanoïde doit donc posséder cette faculté d'analyse et de décision vis à vis du but qui lui a été fixé [Avr08].

#### 3.1 Règles de navigation

Plusieurs règles régissent notre comportement piétonnier. On peut diviser ces règles en deux classes principales, les règles locales et globales [Avr08].

- ✓ **Les règles globales:** Ce type de règle est parfois surprenant, par exemple quelques chercheurs ont constaté que nous marchons plus du côté droit du trottoir comme si nous appliquions le code de la route sur notre propre navigation piétonne. S.Donikian [Don00] nous explique également qu'un code social est mis en œuvre dans le but d'éviter les collisions et d'informer les autres piétons par des comportements d'externalisation, de scrutation et de minimisation des ajustements.
- ✓ **Les règles locales:** Ce type de règles est, comme son nom l'indique, local au déplacement du piéton. Par exemple lorsqu'un piéton se déplace le long d'un trottoir il ne se soucie pas des voitures, tandis qu'aux abords d'une traversée de rue, les voitures vont entrer en compte dans son analyse et sa prise de décision [Avr08].

### 4. Détection de voisinage et évitement

Tout au long de nos déplacements citadins nous sommes constamment amenés à nous éviter les uns les autres afin d'empêcher une éventuelle collision. Ceci met en relief le fait que nous sommes en perpétuelle analyse de la direction et de la vitesse des personnes qui nous entourent. F.Lamarche et S.Donikian [LD04] nous présentent les quatre principaux types de collision : frontale, statique, de dos et de côté (figure 3.2). Mais il existe également deux types d'entités avec lesquelles il est possible d'entrer en collision : les entités statiques et celles dynamiques. Afin d'éviter ces collisions, la meilleure solution est de savoir les prédire [Avr08].



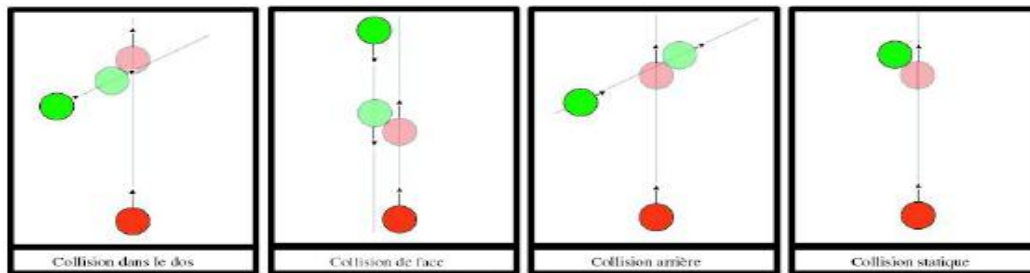


Figure 3.2: Quatre types de collision

#### 4.1 Connaissance de l'entourage

Pour prédire au mieux ces collisions, les humanoïdes doivent connaître leur entourage. Plusieurs contraintes algorithmiques doivent alors être prises en compte comme le temps de calcul lors de la simulation de plusieurs milliers de personnes. Différentes techniques ont été proposées comme les Bin-Lattices de C.Reynolds [Rey00] correspondant à une subdivision de l'espace en boîtes appelées bins. La triangulation de Delaunay est également utilisée, F.Lamarche propose de l'utiliser entre les agents [LD04] ainsi chaque piéton est relié à ses voisins eux-mêmes reliés à leurs propres voisins. Il existe également une méthode utilisant des Kd-trees, divisant l'environnement en différentes zones et indiquant si ces zones sont vides ou non. Dans notre travail nous utilisons la décomposition de l'environnement par des zones contenant des cellules.

#### 4.2 Adaptation pour l'évitement

Afin d'éviter une collision, différents paramètres peuvent être modifiés. En fonction du type de collision détecté, une adaptation de la vitesse peut être souhaitée telle une accélération ou une décélération, mais également un changement de direction tel l'évitement à droite ou à gauche. Le choix des paramètres à adapter dépend de la configuration spatiale et temporelle de l'éventuelle collision [Avr08].

- ✓ **Évitement d'entités statiques:** Si l'objet à éviter est fixe, la technique la plus utilisée est celle de la modification de la planification de chemin. En d'autres termes cela consiste à recalculer le chemin à suivre en allant désormais de la position actuelle, en passant à droite ou à gauche de l'objet pour reprendre ensuite la direction de la destination souhaitée.

- ✓ **Évitement d'entités dynamiques:** G.Thomas et S.Donikian [TD00] propose une méthode minimisant le nombre d'interactions entre les piétons afin d'éviter la collision. Leur méthode prend en compte la distance entre les agents et détermine quelle règle d'évitement choisir pour minimiser les interactions. Avant chaque changement de direction, une prédiction de la future configuration est étudiée afin de déterminer si elle ne donnera pas lieu à une collision. Pelechano et al. [PAB07] dans leur modèle à base de force propose, lorsqu'un piéton pénètre dans le rectangle d'influence présent autour de chaque agent, d'appliquer une force tangentielle afin de modifier légèrement la trajectoire et d'éviter ainsi la collision. S.Paris et al. [PPD07] propose une méthode de prévision de ces collisions. Pour cela, il représente dans un espace en 3D, les directions et les vitesses de l'agent de référence sous forme conique, tandis que la position de l'agent voisin est représentée sous forme cylindrique représentant sa vitesse et sa direction. Les collisions futures sont les surfaces d'intersection entre le cylindre et le cône.

## 5. Modèles de simulation de comportement de navigation

La représentation de l'environnement ainsi que la possibilité d'atteindre un but fixé en évitant les obstacles statiques de l'environnement sont suffisants pour gérer la navigation d'un seul piéton à l'intérieur d'un environnement. Dans le cas où plusieurs piétons naviguent, un nouveau facteur est à prendre en compte: l'évitement de collision avec les entités dynamiques.

Deux problèmes se posent alors: comment détecter efficacement les collisions et quelle réaction adopter ? La détection de collision pose le problème de la complexité des calculs; la réaction à adopter pose le problème du réalisme du comportement. Nous présenterons les modèles informatiques dédiés à la simulation de ce comportement.

Certains algorithmes de navigation vont plus se baser sur l'aspect réglé du mouvement, autrement dit, ils utilisent un système à base de règles. D'autres utilisent des modèles plus orientés vers la notion de force comme le modèle Hi-DAC [PAB07], modèles tendant à représenter les humanoïdes plus sous forme d'animation de particules que de mouvement humain. Enfin, d'autres algorithmes sont basés sur la géométrie prenant en compte la direction et la vitesse des entités [Avr08].

### 5.1 Résultats d'observation sur le comportement piétonnier

Nombreuses sont les études qui ont été conduites sur le problème du comportement piétonnier. Dans le domaine de l'étude des flots, des statistiques sont effectuées en vue d'analyser le comportement piétonnier pour assurer, à plus long terme une certaine qualité de navigation. Au cours de ces études, un certain nombre de caractéristiques de ce comportement ont pu être mises en évidence [Hel01]:

- ✓ Les piétons montrent une certaine aversion à prendre des détours ou à marcher dans une direction opposée à leur direction désirée (celle les menant vers leur but), même dans des environnements peuplés. Cependant, ils ont tendance à choisir la route la plus rapide qui n'est pas forcément la plus courte. En général, les notions de détour et de confort de navigation sont prises en compte, en vue de minimiser l'effort à fournir.
- ✓ Chaque piéton possède sa vitesse individuelle correspondant à la vitesse la plus confortable, autrement dit, celle qui permet de minimiser la dépense d'énergie. Du point de vue de la personne, cette vitesse est corrélée à plusieurs facteurs comme le sexe et l'âge par exemple. Le respect de cette vitesse dépend aussi de facteurs externes tels que la raison du déplacement (la personne est-elle pressée ou non ?) ou encore de la densité de la foule.
- ✓ Les piétons tentent de conserver une certaine distance avec les autres piétons et les obstacles de l'environnement. Cette distance varie en fonction du contexte, elle se réduit si le piéton est pressé ou si la foule devient dense. Dans le cas de piétons stationnaires (attente d'un train, attente d'un bus...), la tendance est de se répartir uniformément dans l'espace. Cependant, autour des endroits attractifs (statue, monument...), la densité des piétons augmente. Les individus se connaissant peuvent former des groupes; ces groupes ont alors tendance à exhiber un comportement similaire à celui d'un piéton seul.
- ✓ Lorsque la densité des piétons devient grande, la tendance générale ressemble à l'évolution d'un fluide. Au milieu de foules statiques, on peut remarquer une tendance à créer des flots; en environnement dense, on peut remarquer la formation de zones de navigation regroupant des piétons allant dans la même direction.

- ✓ Dans les situations de paniques, les individus ont tendance à développer des comportements « aveugles » et essaient de se déplacer beaucoup plus vite que de normale. Les interactions entre les piétons deviennent alors physiques, allant jusqu'à la bousculade. Les personnes blessées ou tombées constituent alors des « obstacles » gênant la progression. Finalement, un comportement mimétique est en œuvre; les piétons ont tendance à faire comme les autres, à aller où vont les autres, au détriment de l'exploitation d'opportunités de sorties différentes.

Ces résultats exposent les tendances générales associées à la navigation. D'autres études se sont plus particulièrement intéressées à la manière d'éviter une collision et à la direction adoptée. Selon Goffman [**Gof71**], en accord avec le premier point suscité, les piétons sont réticents aux changements de direction, et lorsqu'ils y sont obligés, ils privilégient les plus petits changements minimaux. Un piéton aura donc tendance à effectuer un évitement de collision en minimisant l'angle de déviation. Cependant, comme le fait remarquer Lee [**WL92**], l'organisation globale des flux piétonniers est similaire à celle observée pour les véhicules respectant le code de la route. Autrement dit, en Angleterre nous trouverons une tendance à l'évitement à gauche, alors qu'en Algérie, la tendance sera à l'évitement à droite. Dans le cas de situations relativement denses, l'application de cette règle permet d'obtenir un consensus global. Les flots s'organisent, ayant pour conséquence une circulation plus fluide.

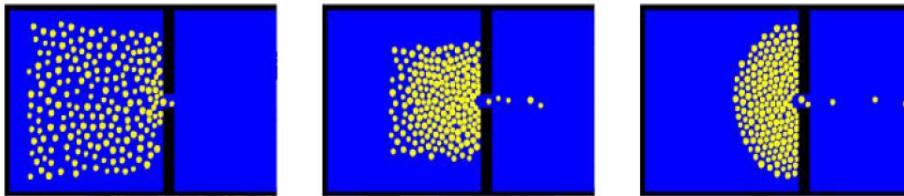
## 5.2 Modèle à base de particules

Ce type de modèle est l'un des plus utilisé dans les modèles de situation de panique, qui ne nécessite qu'une procédure comportementale simple (aller vers un endroit, généralement une sortie). Il est introduit par I. Peschl [**Pes71**] en 1971, ce modèle fait l'analogie entre le déplacement d'individus en forte densité, n'ayant quasiment pas de liberté de déplacement, et l'écoulement de particules dans des compartiments. I. Peschl [**Pes71**] indique dans son étude que cette modélisation est pertinente pour le cas où une forte densité de personnes est confinée et en état de panique. Quand le flot se dirige vers une unique issue, on voit apparaître un phénomène d'agglutination. Au final, le débit de l'issue devient quasi nul. Le parallèle peut être fait avec des billes introduites dans un récipient percé, qui tombent grâce à la force de la gravité mais sont bloquées à cause de la poussée croissante qu'elles exercent [**Par7**].

I. Peschl, en faisant des expériences à la fois sur des personnes et sur des billes de métal, a déduit les règles suivantes :

- ✓ Quand la largeur d'une issue augmente, la probabilité d'apparition d'une arche diminue tandis que la variation du débit augmente.
- ✓ La probabilité d'apparition d'une arche croît avec la densité.
- ✓ Le flux est linéairement proportionnel à la largeur de l'issue.
- ✓ Les pulsations du flux à travers une issue sont induites, le plus souvent, par la formation et la résorption des arches.

On peut voir apparaître dans la figure (Figure 3.3) un phénomène d'agglutination quand les entités modélisées se dirigent vers une issue unique.



**Figure 3.3:** Phénomène d'agglutination de particules

Il est apparu que les modèles à base de particules pouvaient être utilisés pour la modélisation du comportement de piétons et donc de la simulation de foules. Ceci est dû certainement à l'analogie souvent faite entre le mouvement d'une foule et les mouvements fluides. La modélisation du comportement consiste donc à définir les forces auxquelles un piéton est soumis lors de la navigation.

L'approche de Bouvier [BCN97] consiste à associer à chaque type de piéton une classe de particules. Ces particules peuvent changer d'état en fonction de leur environnement, traduisant ainsi une décision associée au comportement du piéton. Elles peuvent ensuite être soumises à plusieurs champs tels que des champs attracteurs (modélisation de buts) et des champs de décision permettant de changer leur état, et donc de modéliser des comportements dépendants de la localisation. Enfin, en fonction de leur proximité respective, elles exercent des forces de répulsion permettant d'éviter les collisions. Ce modèle a notamment été utilisé pour conduire des simulations de grande envergure telles que la simulation de foules dans le stade de France.

Helbing pour sa part, s'est attaché à modéliser les interactions liées au comportement piétonnier à travers un système de forces socio psychologique appliquées aux particules

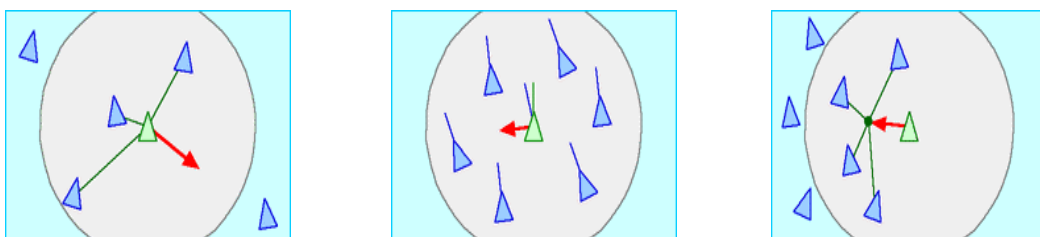
représentant les entités. Ces forces traduisent la tendance à garder une certaine distance avec les autres piétons lors de la circulation ou le comportement de friction associé au contact avec un autre piéton. Ceci en prenant en compte la force attirant le piéton vers un but fixé. Ce modèle a été utilisé dans le cadre de la modélisation du comportement de panique [HFV00]. Toujours dans ce cadre et sur la base du modèle d'Helbing, Braun [BMO+03] a défini l'influence de la connaissance entre les entités lors de situation de panique par l'intermédiaire de forces. Lorsque les entités se connaissent, elles peuvent, en fonction de paramètres d'altruisme et de dépendance, s'entraider pour sortir d'une situation critique; le but étant de pouvoir étudier l'impact de ce type de comportement sur l'évacuation de lieux sinistrés. La modélisation de ce comportement se fait par l'intermédiaire de forces d'attraction pondérées par un facteur d'altruisme et un facteur de dépendance.

### 5.3 Le modèle à base de règles

Le déplacement de chaque individu est régi par des règles de comportement de la forme « si condition alors action ».

Trois règles sont proposées par Craig Reynolds [Rey87], dans le cadre de l'animation de nuées (Figure 3.4):

- ✓ *Séparation*: afin d'éviter d'éventuelles collision avec ses voisins.
- ✓ *Alignement*: afin de réguler sa vitesse par rapport à l'ensemble du groupe.
- ✓ *Cohésion*: afin de rester proche de ses voisins.



**Figure 3.4:** Règles comportementales du modèle Flocks of Boids

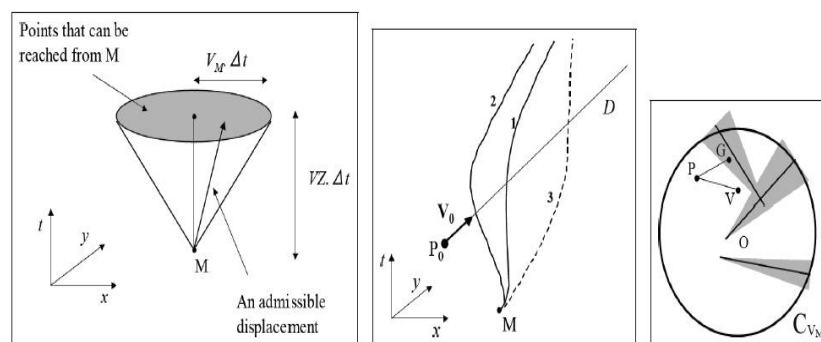
Dans ce modèle l'autonomie de l'entité est bridée par le fait que son comportement est uniquement défini en fonction de celui de ses voisins. On a alors deux catégories d'individus : des leaders qui choisissent réellement la trajectoire, et des suiveurs qui se contentent d'évoluer suivant le mouvement général en appliquant les règles d'évitement. C. Hartman et B. Benes

[HB06] proposent de ne pas fixer le leader lors de la simulation, mais plutôt d'introduire une nouvelle règle permettant à une entité standard de prendre la place du décideur actuel.

Les modèles à base de règles proposent une approche plus souple permettant d'introduire des adaptations variées dans différentes situations. Néanmoins, le caractère itératif de la décision rend difficile la fusion d'informations, les règles étant indépendantes les unes des autres.

#### 5.4 Modèle prédictif

Feurtey [Feu00] propose une approche prédictive de l'évitement de collision. Pour cela il représente, dans un repère  $(x, y, t)$ , l'environnement au sein duquel les entités naviguent.



**Figure 3.5:** Modèle prédictif de navigation de Feurtey

Dans ce repère, l'ensemble des déplacements possibles pour une entité donnée se représente sous la forme d'un cône, dont la pente correspond à la vitesse maximale  $V_M$  de l'entité, et dont le sommet est sa position actuelle  $M$ . Le cercle des déplacements admissibles en un laps de temps  $Dt$  est donc le cercle inclut par le cône dont le rayon est  $V_M.Dt$ . Ensuite, une collision est représentée dans le cône sous la forme d'un segment, dans le cas où la trajectoire d'une entité voisine l'intersecte. Pour représenter l'imprécision de la prédiction de la trajectoire, en cas de changement de direction, la zone de collision potentielle est étendue par un triangle [Par08].

F. Feurtey part du principe que pour éviter des collisions, un individu applique trois règles avec différentes priorités :

1. Préserver sa direction.
2. Préserver sa vitesse.
3. Préserver le temps nécessaire au déplacement.

---

Des exemples de l'utilisation du principe cette méthode sont retrouvée dans la littérature [SC06]. F.Lamarche et S.Donikian [LD04] proposent un modèle prédictif à base de règles d'évitement et d'optimisation. La subdivision spatiale utilisée est une triangulation de Delaunay filtrée, de cette subdivision est extraite une planification de chemin. Celle-ci est analysée afin de trouver une vitesse idéale à adopter. Cette vitesse est ensuite filtrée par l'espace personnel, qui est une règle sociale définissant une distance minimale entre la navigation des autres humanoïdes et entre les obstacles.

Ensuite, afin d'éviter des collisions, la vitesse est modifiée. Un module de sécurité veille tout de même à ce que la vitesse prenne en compte l'inertie de l'humanoïde.

Un premier point faible de cette méthode est qu'elle ne propose pas de méthode pour inclure les obstacles statiques de l'environnement, tels que les murs, qui jouent pourtant un rôle prépondérant dans la prise de décision de la navigation. Un autre désavantage est que cette méthode considère les collisions séparément les unes des autres en appliquant sa fonction de coût, bien que celles-ci soient unifiées en une seule représentation. Ce second point bride le principe de prédiction, en négligeant des liens de dépendances entre plusieurs collisions (comme deux personnes marchant côte à côte) [Par07].

Nous avons exposé trois techniques permettant de simuler individuellement les circulations de personnes. Nous nous sommes concentrés ici sur le caractère réactif de la décision lors du mouvement pédestre : la navigation réactive.

La première conclusion que l'on peut tirer des modèles présentés est qu'aucun de ceux ci ne permet, seul, de gérer toutes les situations potentielles des mouvements de personnes.

Certains sont plus axés sur l'obtention de performances de calcul, d'autres sur la robustesse de la résolution, certains donnent une grande part à l'organisation sociale, et d'autres appuient plus sur la décision individuelle. Le danger lors de la réutilisation de ces modèles est donc de les exploiter en dehors du contexte pour lequel ils ont été créés, et validés. D'autre part, ces modèles n'abordent pas le caractère plus global de la décision relative au déplacement. Nous verrons par la suite que d'autres techniques sont nécessaires pour traiter ce sujet, et sont généralement utilisées conjointement aux modèles exposés ici.

Pour conclure, nous pouvons retenir comme points forts des méthodes évoquées : l'organisation macroscopique émergeant du modèle de particules, le large éventail de situations pouvant être couvert par le modèle à base de règles, et le fort lien avec les logiques de



---

déplacement pédestres du modèle géométrique prédictif. Il serait alors intéressant de se diriger vers un modèle permettant un contrôle fin comme avec les règles, tout en conservant les schémas sociaux mis en évidence avec les particules. Nous pouvons de plus affirmer que le modèle géométrique prédictif doit être le support de la décision de l'individu, celui-ci permettant la mise en place de mécanismes d'adaptation réalistes.

### 5.5 Environnements urbain informés

Les modèles présentés jusqu'à présent ne prennent que peu en compte la relation qui existe entre l'environnement et les entités le peuplant. Lorsqu'on parle de navigation en environnement urbain, non seulement plusieurs entités peuvent entrer en interaction, mais leur comportement dépend des modalités offertes par l'environnement ainsi que leur perception des lieux. Relieu [RQ98] a caractérisé le concept d'affordance de Gibson [Gib86] dans le cadre de la navigation urbaine. Ce concept permet de traduire l'influence de la typologie de la zone de déplacement sur le comportement du piéton. Pour permettre l'exploitation de tels résultats, le concept d'environnement urbain informé a été introduit.

Parmi les différents types de modélisation, Franc a proposé une décomposition hiérarchique de l'environnement [FBT99] en proposant une représentation fournissant une information géométrique et sémantique. La décomposition se fait par l'intermédiaire d'entités spatiales typées (les ENV), elles mêmes constituées d'autres entités spatiales. Ces entités peuvent représenter des quartiers, des rues, des tronçons de rue, des voies de navigation (route/trottoir), des immeubles... Le découpage hiérarchique et l'information s'effectuent durant la phase de conception de l'environnement, en exploitant la possibilité d'utiliser des nœuds pour la décomposition hiérarchique tout en les nommant. Pour gérer la navigation et la planification de chemin, les zones de navigation sont informées avec des points d'entrée et de sortie, traduisant ainsi la connexité. Ces informations permettent de construire une carte de cheminement, fournissant aux entités la possibilité de planifier leur chemin à l'intérieur de l'environnement. Le typage des zones permet par exemple de gérer une navigation cohérente à travers des piétons possédant les notions de trottoir et de passage clouté.

Le logiciel VUEMS (Virtual Urban Environment Modeling System) [Don97] a été initialement conçu pour modéliser des environnements urbains pour la simulation de conduite. Thomas, dans le cadre de ses travaux [TD00] a étendu ce logiciel pour y inclure des informations sur les zones de circulation piétonnières comme les trottoirs, les passages piétons...

---

La simulation du comportement de navigation d'humanoïdes virtuels pose plusieurs problèmes et s'avère être un domaine pluridisciplinaire, ceci en plusieurs sens: d'une part en terme de domaines de recherche où les informations issues de la socio-psychologie sont importantes à prendre en compte pour la modélisation informatique du comportement, d'autre part en terme informatique où elle touche à plusieurs problèmes tels que la représentation de l'environnement, la planification de chemin, la détection de collision et la définition de comportements de plus ou moins haut niveau. Pour obtenir une architecture efficace alliant à la fois autonomie et rapidité, les compromis à faire sont nombreux.

## 6. Conclusion

Plusieurs méthodes de description existent déjà dans la littérature, provenant toutes de recherches sur la robotique, les champs de potentiel, les cartes de cheminement, ou encore la décomposition en cellules. C'est cette dernière méthode que nous avons privilégiée, les deux premières n'offrant pas assez de flexibilité dans notre cadre d'application. De plus, nous avons utilisé une décomposition sous forme de grille.

Maintenant, on doit simuler le mouvement des piétons synthétiques dans un environnement urbain en précisant les points essentiels qui interviennent dans le travail qu'on doit réaliser. Le prochain chapitre sera consacré à la conception d'un système de simulation du comportement des piétons dans un environnement urbain en suivant les étapes du cycle de vie d'un logiciel.

---

# Chapitre 4

# Contributions

## 1. Introduction

Il existe peu de travaux sur l'animation comportementale en environnement urbain et par conséquent peu de modèles urbains sont proposés dans ce domaine. Par contre, il existe d'autres domaines où les applications fondées sur des modèles urbains sont nombreuses. Par exemple, dans le cadre de projets de reconstitutions historiques, les modèles géométriques des bâtiments en 3 dimensions atteignent un très bon niveau de réalisme. Un autre exemple est la simulation de conduite où la modélisation du réseau routier fait l'objet de beaucoup d'attention.

L'étude des circulations de personnes est une problématique nécessitant d'appréhender le comportement humain où ce comportement n'est pas seulement un déplacement dans un environnement mais inclut aussi des interactions avec divers équipements. Nous avons ainsi identifié dans la partie précédente plusieurs problématiques qu'il est indispensable de traiter pour aboutir à un modèle permettant des simulations réalistes.

Nous nous intéressons dans ce chapitre à proposer et à concevoir un système qui permet de simuler le comportement des humanoïdes qui circulent dans un environnement urbain en tenant compte des problèmes de collision et de l'évitement des obstacles. Ces humanoïdes circulent dans des trottoirs et traversent les rues en utilisant les passages piétons tout en attendant l'autorisation des feux de signalisations.

Deux grandes phases sont nécessaires à la réalisation d'une simulation:

1. la modélisation de l'environnement et des entités.
2. la simulation : utilisation d'un environnement qui permet de simuler et de visualiser l'évolution des entités dans leur environnement.

---

## 2. Représentation de l'environnement

Afin de réaliser nos simulations, nous avons besoin d'un environnement virtuel urbain en 3 dimensions auquel sont associées des structures et des informations nécessaires à la simulation d'acteurs autonomes. Maintenant que nous avons défini les concepts de l'interaction, attachons nous à la manière de localiser un agent et de situer son raisonnement. Pour se faire, nous allons décrire le support de la simulation : l'environnement virtuel.

### 2.1 Reconstruction 3D par traitement d'images

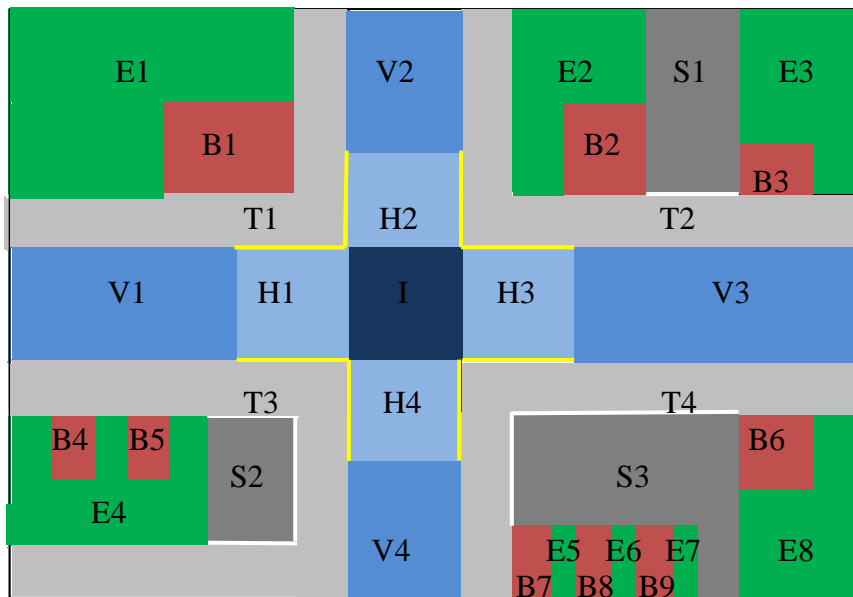
Pour obtenir une ville virtuelle très réaliste avec un modelleur 3D, le travail de modélisations et de collecte de photographies est énorme; une méthode plus séduisante est la reconstruction automatique des villes à partir de photographies aériennes et de connaissances sur l'environnement. Bien que les techniques de reconstruction ne soient pas encore complètement automatiques, les résultats obtenus sont prometteurs. En plus de générer une scène géométrique en 3D, les techniques de reconstruction fournissent une description sémantique de la scène via la géométrie et les propriétés physiques des modèles [Tom99].

### 2.2 Subdivision de l'environnement

En effet, l'environnement virtuel est au centre de notre problématique. Il se doit d'être aussi proche de la réalité que possible, et doit permettre l'extraction de données non seulement pour le déroulement de la simulation, en vue d'une utilisation par les agents autonomes, mais aussi pour l'étude a posteriori, en vue de la caractérisation des résultats. Ainsi, il va intégrer l'ensemble des informations nécessaires à la prise de décision de nos agents autonomes, que ce soit la géométrie et la topologie des lieux, ou encore l'emplacement des différents équipements.

#### a. Géométrie

À partir d'un environnement construit en trois dimensions, une description géométrique de cet environnement en 2D est extraite, cette description consiste à découper la scène en un ensemble de zones. La figure 4.1 montre la description géométrique associée à un échantillon de ville constitué des espaces routiers (V1...V4), des bâtiments (B1...B9), des parcs (S1...S3), des espaces verts (E1...E8), des trottoirs (T1...T4) et les passages des piétons (H1...H4).



**Figure 4.1:** Description géométrique de l'environnement

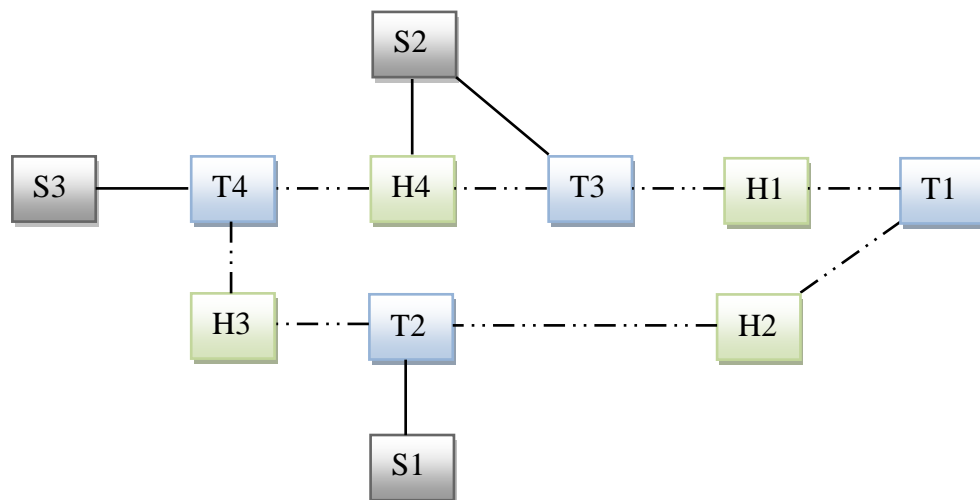
### b. Topologique

Afin que les piétons circulent partout, nous définissons une structure topologique correspondant à un graphe de circulation. Nous allons donc présenter, la façon dont nous organisons les données topologiques pour permettre une navigation optimale des entités.

L'association des informations à la structure géométrique de l'environnement produit deux graphes (le graphe de zone et le sous graphe de cellules):

#### b.1 Graphe de zones

Un graphe est extrait depuis cette subdivision, dont les nœuds représentent les zones obtenues et dont les arcs représentent leurs relations de voisinage. (Figure 4.2) Notons que seules les cellules navigables sont extraites de la subdivision, le découpage interne aux obstacles n'étant pas nécessaire pour les déplacements d'entités.



..... Traverser avec condition (feu rouge)

**S**: Sol

**H**: passage de piétons

**T**: trottoirs

**Figure 4.2:** graphe de zones

### b.2 Sous graphe de cellule

La construction de sous graphe de cellule consiste à découper chaque zone en un ensemble de cellules de petites tailles ou chaque cellule peut être un espace libre ou peut contenir un obstacle.

Plusieurs informations sont associées au sous graphe de cellule :

- Le contenu de cellule est un agent, on associe un nombre positif à cette cellule.
- Le contenu de cellule est un obstacle, le nombre associé à cette cellule est -1.
- La cellule est vide, cela est représenté par 1.

### 3. Structure de notre système

La structure générale du système comporte plusieurs modules qui permettent de simuler notre système, La priorité est donnée au comportement de base des individus. Chaque individu a un répertoire des comportements de base [Rey99]:

- l'évitement de collision,
- l'évitement d'obstacle,
- la recherche de but,
- ✓ La première étape de notre système est la modélisation de l'environnement.
- ✓ La deuxième étape c'est l'initialisation de l'environnement.

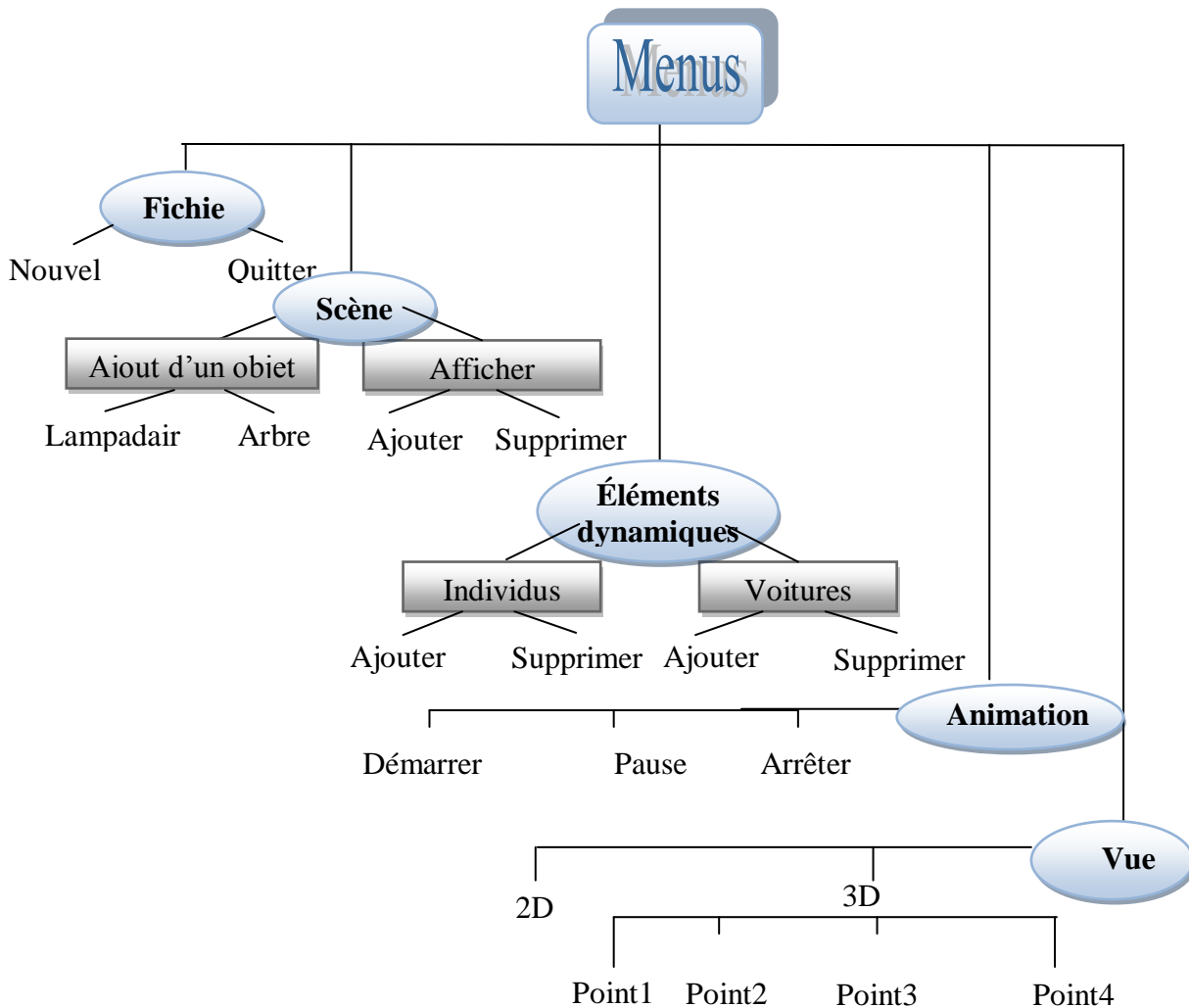
#### 3.1 L'interface graphique

L'interface graphique est l'outil de communication avec le système. Elle lui permet de saisir les différentes données nécessaires pour que le système donne les résultats attendus, en plus du rendement des résultats (animation).

L'utilisateur doit saisir les informations suivantes via l'interface graphique offerte par le système :

- ✓ Insertion des objets statiques (arbres, lampadaires) et des objets dynamiques (les individus et les voitures).
- ✓ Suppression des éléments déjà existants.
- ✓ Le choix d'entamer l'animation des piétons dans notre système ou de l'arrêter.

L'interface spécifique facilite la tâche des utilisateurs qui veulent consulter le système représentée par un ensemble de menus et de boutons .Les menus sont représentés dans la figure (Figure 4.3) suivante:



**Figure 4.3 :** Organisation des menus de l'interface graphique

#### ✓ Description des menus

L'interface graphique offre à l'utilisateur un ensemble de menus permettant d'effectuer des opérations pour communiquer avec le système. La description de ces menus est la suivante :

**Fichier :** Ce menu offre la possibilité d'effectuer les opérations suivantes:

- *Nouvelle Scène:* Créer une nouvelle scène en éliminant tous les objets créés précédemment.
- *Quitter:* Quitter totalement l'application.

**Scène :** Ce menu offre la possibilité d'effectuer les opérations suivantes:

- *Ajout d'un objet :* il permet de saisir le choix d'un nouvel élément statique, il est décomposé en deux sous menus.



- *Individus* : nous avons la possibilité de sélection, d'ajouter ou de supprimer des individus dans la scène.
- *Voitures* : nous avons la possibilité de sélection, d'ajouter ou de supprimer des voitures dans la scène

**Animation** : Ce menu contient les trois choix suivants :

- *Démarrer* : le démarrage de l'animation des individus déjà créés dans la scène choisie
- *Pause* : bloquer l'animation avec la possibilité de la restaurer par un deuxième click.
- *Arrêter* : arrêter complètement l'animation.

**Vue** : Ce menu contient deux choix :

- *2D* : *affichage* de la scène en deux dimensions.
- *3D* : on doit choisir une vue 3D parmi 4 points de vue : Point1, Point2, Point3 et point4

### 3.2. Modélisation de la scène

Rappelons que notre but est de simuler le comportement d'un humanoïde dans un environnement urbain. La scène est ainsi formée par un ensemble d'obstacles, passage pour les piétons et passage pour les voitures.

Nous avons choisi deux types d'objets à modéliser:

#### a. L'environnement

A l'intérieur de la scène on trouve les objets fixes constituant l'environnement. Ils sont classés comme suit, selon leur nature:

**1. Les voies** : des espaces réservés aux piétons et/ou véhicules tel que :

- *Les trottoirs* : sont des espaces traversables considérés libres mais qui peuvent contenir des obstacles de différents types. Les trottoirs sont caractérisés par leurs frontières qui sont franchissables par les piétons et non franchissables par les véhicules. Les obstacles sont soit des lampadaires ou des feux de circulation. Nous avons choisi des formes simples pour représenter les obstacles; des cylindres et des cubes, l'objectif essentiel de l'acteur est d'éviter ces obstacles lors de son déplacement. Ces derniers peuvent être considérés comme obstacles pour un piéton passant ou une source d'information pour les véhicules et piétons qui veulent traverser la rue.

---

- **Les passages piétons** : c'est un espace qui peut jouer deux rôles séparés : on le considère comme zone interdite aux piétons et un espace traversable pour les véhicules comme on peut le considérer inversement. Pour synchroniser entre l'accès aux passages par un élément dynamique, nous devons intervenir un objet nécessaire dans la simulation de la traversée de rue qui est le feu de circulation.

Deux types de frontières délimitent un passage piéton:

- ✓ Les frontières qui relient les trottoirs et les passages piétons : franchissables pour les piétons.
  - ✓ Les frontières qui relient les passages de voitures et celles de piétons : traversables pour les voitures.
- **Les passages de voitures** : pour les véhicules, c'est le seule espace associé (considéré traversable).

**2. Les espaces libres** : sont de deux types :

- **Les parcs** : des espaces réservés à la circulation aléatoire des piétons et qui contiennent des obstacles.
- **Les espaces verts** : espaces non circulables considérés comme buts pour les piétons.

**3. Les mobiliers urbains**

- **Les blocs** : Occupent des espaces non circulables de l'environnement, considérés comme buts pour les piétons.

La figure (Figure4.4) suivante résume les différents objets qui constituent l'environnement virtuel urbain, définis précédemment.

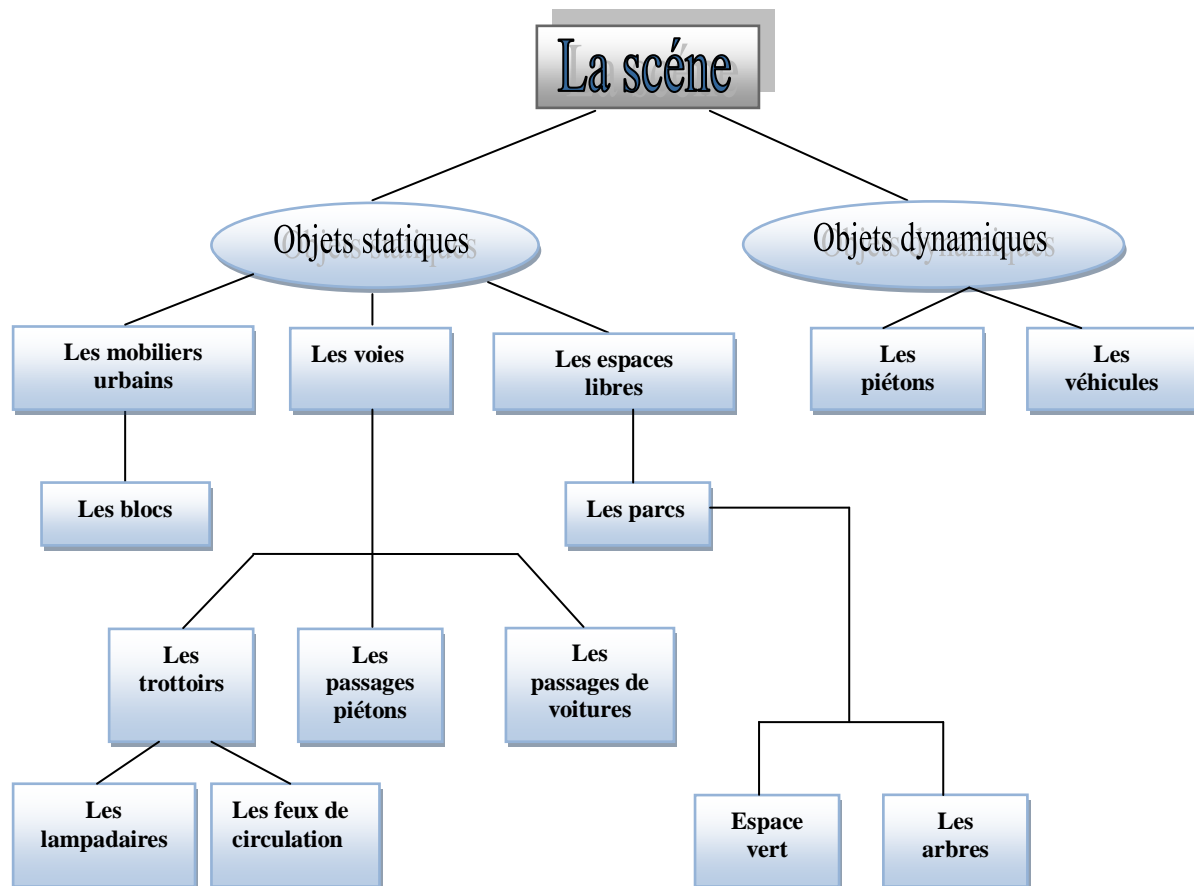


Figure 4.4: La définition des modèles d'objets

### b. Les individus

Ce sont les éléments essentiels dans notre simulation, ils représentent les agents virtuels. Nous avons modélisé les individus par une combinaison de formes simples (triangle, cylindre et sphère).

**3.3 Initialisation de la scène:** l'initialisation est une opération primordiale pour l'établissement de l'animation où l'utilisateur donne les informations nécessaires via l'interface graphique concernant les piétons et leurs coordonnées (piétons, type, point de départ, but...), les véhicules (point de départ) et les obstacles (position).

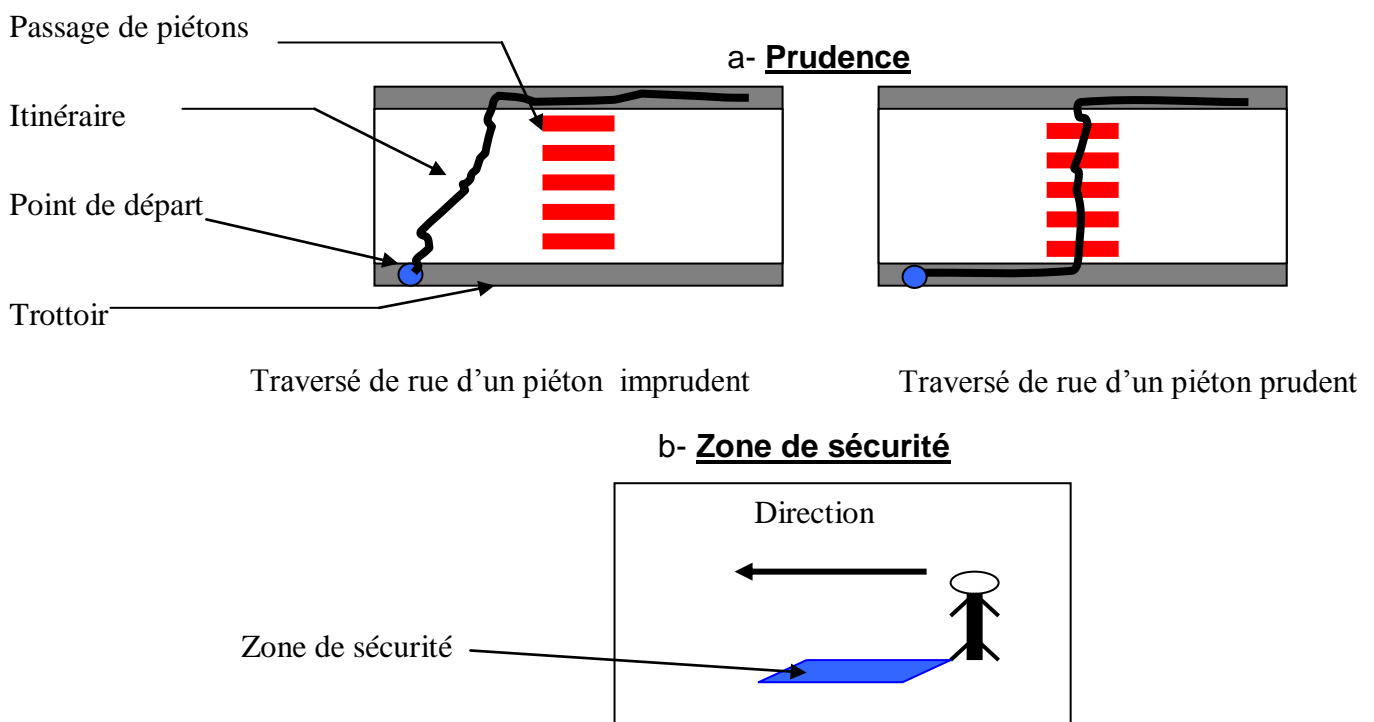
#### 3.3.1 Les piétons

Les piétons peuplant la simulation sont conçus dans l'objectif d'en faire des acteurs autonomes capables d'analyser leur situation afin de choisir les actions appropriées en fonction de leurs objectifs. Le fonctionnement d'un acteur peut se résumer en trois sous fonctions :

percevoir, décider et agir, le piéton perçoit son environnement et prend une décision qui sera réalisée par une action. Le déplacement d'un point à un autre simule la tâche de locomotion.

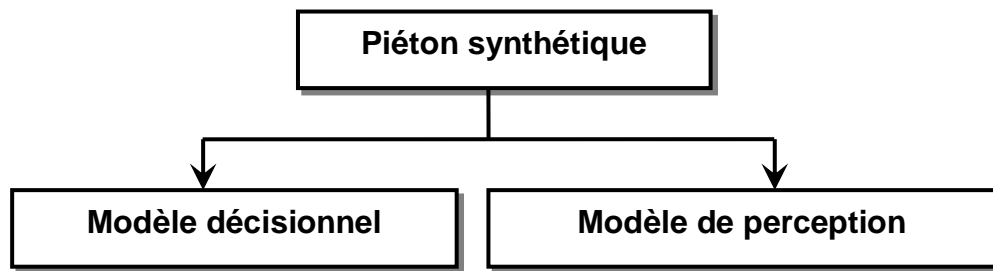
✓ *Caractéristiques d'un piéton*

- **prudence** : c'est la source des stratégies de planification de chemin. Le piéton doit passer par des zones qui assurent sa sécurité (trottoirs et passages piétons), cette caractéristique influence sur la planification de trajectoire. il peut exister plusieurs chemins mais le piéton doit choisir le chemin optimal (le plus sécurisé mais pas le plus court).
- **La zone de sécurité** : chaque piéton a une zone qui s'étend devant lui. Elle lui permet d'éviter les collisions. Lorsqu'un piéton entre dans la zone de sécurité d'un autre piéton, la possibilité d'une collision est signalée.



**Figure 4.5:** Caractéristiques d'un piéton

✓ *modèle comportemental utilisé du piéton synthétique*



**Figure 4.6:** Modèle de piéton synthétique

**Modèle décisionnel** : pour représenter le modèle décisionnel on va utiliser l'approche par règles de comportement qui prend en entrée des informations restituant une certaine perception de l'environnement et produit en sortie une action. Le comportement des piétons est défini par un ensemble de règles de la forme:

**Si** (condition) **alors** (action).

**Modèle de perception** : l'accès direct à la représentation numérique de l'environnement simule la perception des individus.

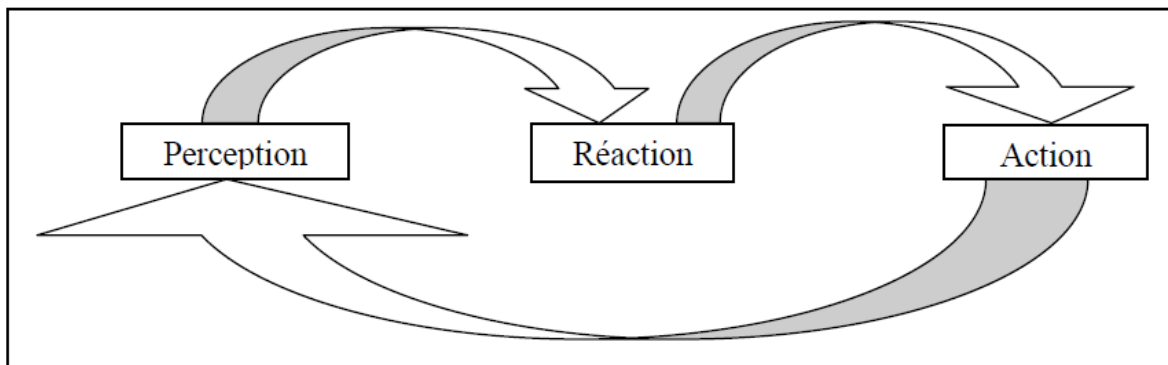
**3.3.2: Les véhicules** : sont des objets qui circulent dans leur espace réservé (route), ils sont représentés par un niveau d'abstraction élevé. Le seul comportement modélisé est le respect du code de la route.

## 4. Recherche du chemin

Le principe de l'algorithme A\* réside dans le fait que pour chaque point de passage de la map (une case pour la représentation matricielle, un point pour la représentation polygonale). Il continue sa recherche en prenant en compte le point voisin, Le plus prometteur pour l'obtention du chemin optimal (point qui à le coût le plus faible). Ainsi, dès qu'on a trouvé le point final, on est sûr d'avoir passé par le chemin optimal. L'algorithme A\* permet de trouver un chemin optimal d'une façon efficace: il est rapide, relativement simple, et souple [Gam02].

**5. L'animation:** Ce module simule le comportement d'un ensemble de piétons dans un espace urbain. Il est le plus important de notre système, il opère suivant trois phases:

- ✓ Perception des objets et autres acteurs dans l'environnement, ce qui fournit des informations sur la nature et la position des objets.
- ✓ Utilisation de l'information par le modèle comportemental pour décider de l'action à exécuter, ce qui va produire des paramètres pour une procédure de mouvement.
- ✓ Réalisation du mouvement par l'acteur, en action finale.



**Figure 4.7:** Boucle d'animation comportementale

Ce schéma présente les principales actions qui forment l'animation comportementale: la perception, la réaction et l'action.

### 5.1 Perception

La perception est définie comme la conscience des éléments dans l'environnement qui exprimée à travers des sensations physiques. Elle est réalisée en équipant les agents de détecteurs visuels tactiles et auditifs. Ainsi, ils simulent le comportement quotidien humain telle que la locomotion adressée visuellement, la manipulation d'objets et la réponse aux sons et aux énonciations.

Le sous-système perceptuel les plus importants est le système visuel. Une approche basée sur la vision est idéale pour la modélisation d'une animation comportementale et offre surcroît une approche universelle pour le passage d'information de l'environnement à l'acteur dans le contexte de recherche de chemin, d'évitement d'obstacles et de représentation des connaissances internes.

La perception d'un acteur peut être limitée aux objets ainsi qu'aux autres acteurs dans le voisinage. Mais cela limite le nombre de comportements possibles parce que seules la présence et les caractéristiques d'un objet ou d'un acteur sont impliquées dans la sélection d'un comportement; les actions des autres acteurs ne sont pas prises en compte.

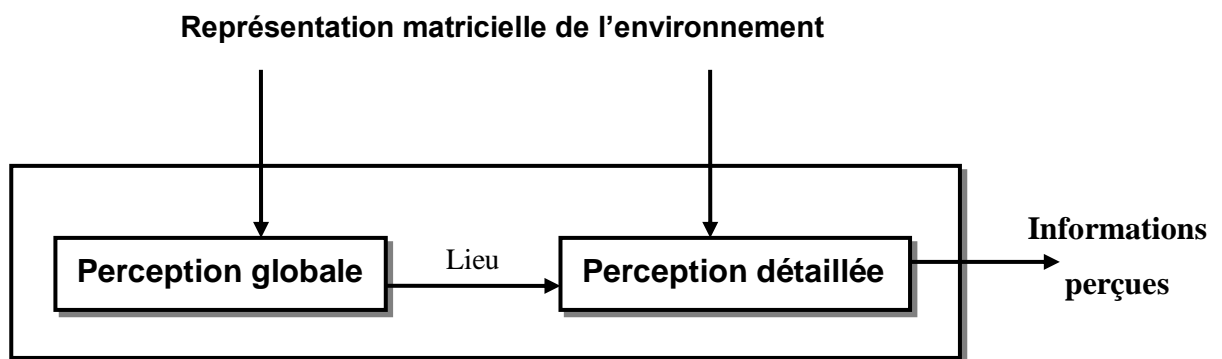
Chaque personnage est doté d'une vision qui lui permet de récolter un certain nombre d'informations sur l'environnement, dans une direction donnée, et jusqu'à une certaine limite.

Grâce à la vision, le personnage peut alors détecter ce qui se passe devant lui, plus précisément, détecter d'éventuelles collisions sur le chemin.

La notion de vision est très importante dans la gestion du déplacement, dans le sens où un personnage ne doit pas attendre d'entrer en collision pour essayer d'y remédier. La vision permet donc de prévoir un obstacle sur la trajectoire et de donner au personnage la possibilité de l'éviter.

Le module de perception produit trois types de perceptions: la perception de la présence d'objets et acteurs, la perception des actions des acteurs et la perception des acteurs exécutant ces actions.

Le module de perception est réparti en deux sous modules représenté dans La figure4.8:



**Figure 4.8:** Module Perception

✓ **Perception globale** : ce composant répond à la question suivante : Où se trouve le piéton **X** à ce moment là ? Puisqu'on a décomposé l'environnement en zones, en tenant compte la réaction du piéton envers les éléments de chaque zone (trottoir, passage de piétons, zone d'attente des feux de circulation). Les entrées de ce composant sont la structure de l'environnement. La sortie est la réponse à la question : Où suis-je ? (lieu)

✓ **Perception détaillée:** ce composant a comme entrée le lieu du piéton en plus de la représentation matricielle de l'environnement. Les sorties sont les informations perçues de l'environnement: le lieu, l'état des feux, la possibilité de collision et le type de collision (Figure4.9).

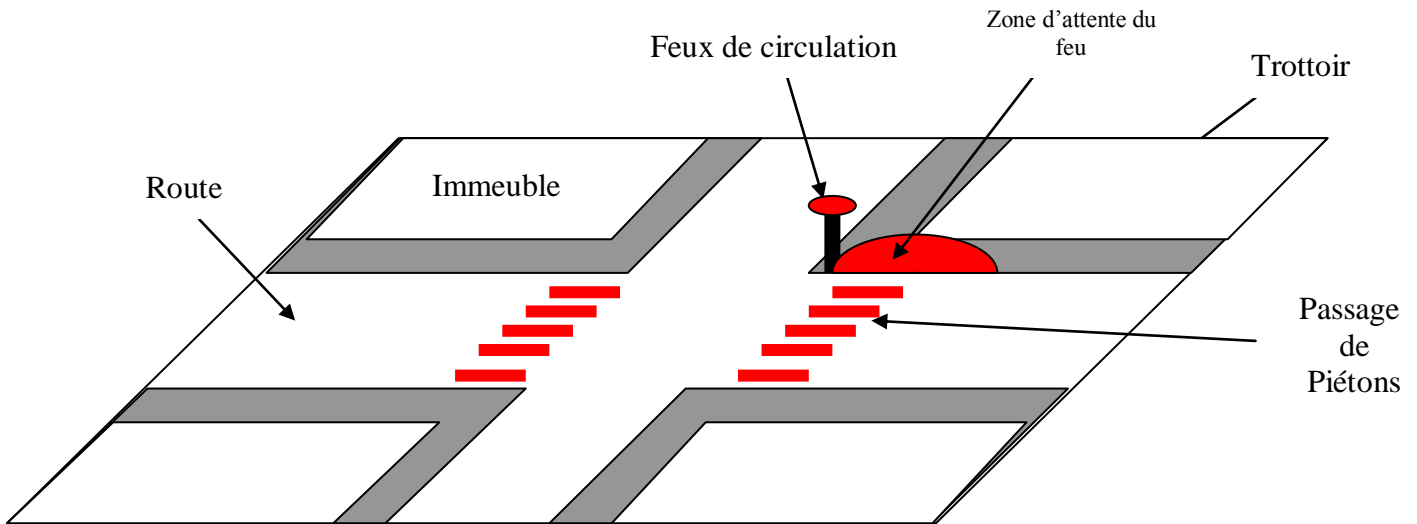


Figure 4.9: Les différentes zones de l'environnement

**5.2 Réaction:** Le modèle comportemental utilisé est l'approche à base de règles de comportement. Il est décrit dans le modèle de piéton synthétique. Ce module est le cerveau de l'humanoïde, il analyse les données perçues et décide le comportement de l'humanoïde (Figure4.10).

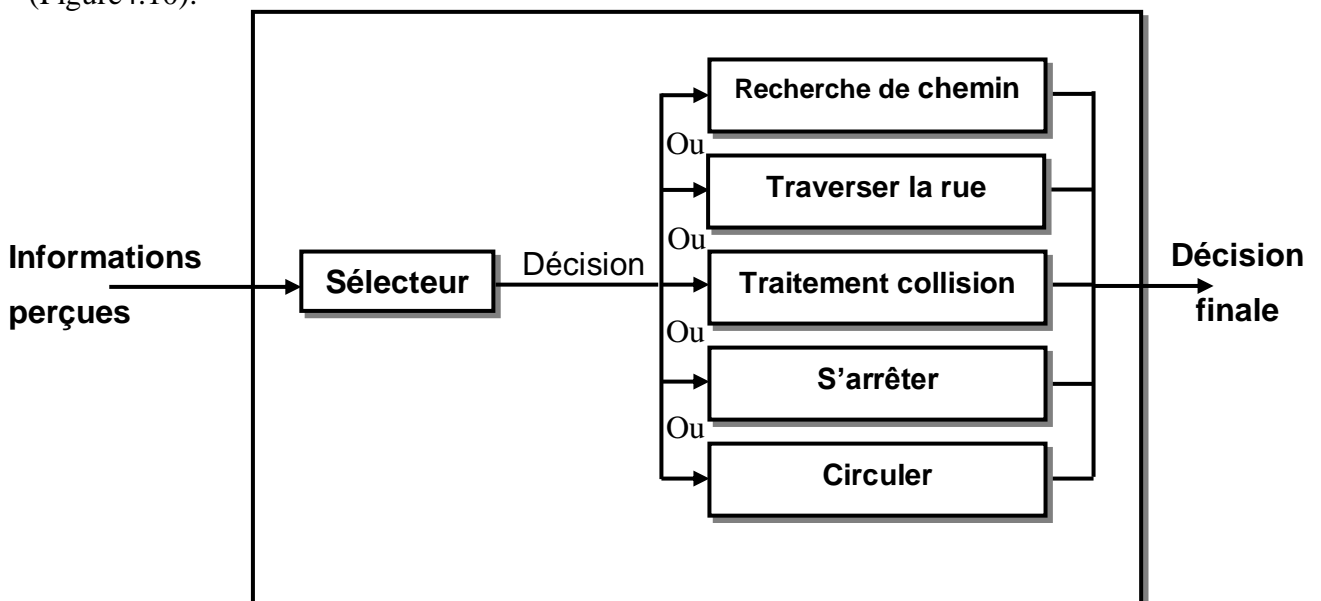


Figure 4.10: Réaction



---

✓ **Sélecteur** : ce composant contient la base de règles de comportement. Selon les informations perçues, le sélecteur choisit la règle de comportement adéquate (décision).

L'algorithme de fonction sélecteur est le suivant:

✓ **Traverser la rue** : dans le cas où le piéton est dans la zone du feu. Le feu est rouge et le piéton veut traverser la rue. Ce module va lui permettre de traverser la chaussée (passer du début jusqu'à la fin du passage).

✓ **Traitement de collision** : il permet aux individus de s'éviter entre eux dans le cas où une collision serait détectée. Selon le type d'un piéton, on décide sa priorité (un vieux est plus prioritaire qu'une femme qui est elle-même plus prioritaire qu'un homme). Si une collision est détectée, le piéton le moins prioritaire devra agir pour éviter un accident. Dans le cas où les piétons auraient la même priorité, le choix du piéton qui va agir est aléatoire.

✓ **S'arrêter** : la suspension de la tâche de déplacement d'un individu.

L'algorithme arrêter est le suivant:

✓ **Circuler** : circuler est le fait de se déplacer d'un point à un autre en suivant l'itinéraire. Le piéton est en train de circuler, s'il a déjà cherché son chemin, il n'est pas arrêté et il ne détecte aucune collision.

### 5.3 Action

C'est la dernière phase dans le cycle d'animation comportementale, l'action est présentée par le déplacement des acteurs dans la scène. Il traduit les décisions provenant du module Réaction à des actions élémentaires. Les actions élémentaires sont soit changement de position (nouvelles coordonnées) ou blocage (mêmes coordonnées).

## **6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons procédé à concevoir un système qui permet de simuler le comportement des humanoïdes dans un environnement urbain, Nous avons proposé un modèle de représentation de l'environnement de simulation. Celui-ci se base sur une représentation de la géométrie des lieux, puis en effectue une abstraction informée sous la forme d'un graphe hiérarchique. Une typologie est associée aux nœuds du graphe topologique, permettant de caractériser globalement les zones de circulation tout en gardant un lien avec leur définition géométrique fine. Nous avons ensuite proposé un ensemble de modèles interdépendants répondant à notre problématique.

Le prochain chapitre va nous permettre d'implémenter les différents composants résultant de la phase de conception en choisissant un langage de programmation et en spécifiant les différents détails de chaque composant du système.

# Chapitre 5

## Validation et Résultats

### 1. Introduction

Le premier objectif de ce travail est la simulation des comportements de piétons dans un environnement urbain. Pour se faire, nous avons proposé dans le chapitre précédent un modèle de simulation permet d'atteindre un certain niveau de complexité du comportement humain. Néanmoins, une dernière étape est nécessaire afin de concrétiser ce travail. Une directive importante pour notre travail est que, comme dans la réalité, chaque piéton virtuel devrait être un individu autonome et intelligent.

Dans notre modèle nous allons présenter les différents algorithmes et les classes avec les méthodes associées pour réaliser les comportements de notre piéton (recherche de chemin, évitement d'obstacle, évitement de collision,....).

Deux problématiques apparaissent alors, concernant d'une part la manière de renseigner une simulation, et d'autre part la façon de restituer ses résultats. Un autre aspect à traiter concerne la validation des résultats obtenus. Ceux-ci devant permettre l'étude de situations et d'environnements concrets, il est en effet nécessaire de les confronter au réel pour en assurer la pertinence. Enfin, comme nous l'avons noté auparavant, une simulation doit être suffisamment rapide pour être utilisée comme outil de travail. Elle doit pouvoir supporter une interaction de l'utilisateur pendant son exécution, au moins dans une phase de réglage, ce qui impose de garantir un certain niveau de performances.

Ce chapitre a pour but de valider expérimentalement, à travers un ensemble de simulations; le modèle proposé dans le chapitre précédent. Nous disposons un système qui permet de simuler le comportement des humanoïdes qui circulent dans un environnement urbain en tenant compte des problèmes de collision et de l'évitement des obstacles

---

## 2. Le langage de programmation et la bibliothèque graphique utilisée

L'implémentation consiste à utiliser un langage de programmation particulier pour implémenter les différents composants du système. Le choix du langage à utiliser repose sur plusieurs critères. Parmi ces critères, on peut trouver la connaissance du langage qui nous a conduit à choisir l'environnement C++Builder.

Du fait que C++Builder n'offre pas la possibilité d'une programmation modulaire, on essaie d'exploiter les caractéristiques de ce langage (unité, objet, fonction etc.....) pour implémenter les différents composants du système. Ce qui implique que chaque composant peut être implémenté en terme d'une unité, d'un objet ou d'une fonction.

L'OpenGL est un système graphique qui permet de visualiser une scène 3D et aussi une scène 2D, en utilisant l'ensemble de ses bibliothèques précisément : gl, glu et glut pour bénéficier des fonctions qu'elles nous ont offertes dans le but de créer notre environnement.

Ce qui suit montre les différents composants de notre système en étalant leurs implémentations. Afin d'augmenter la lisibilité et la compréhension de notre implémentation, on a choisi de présenter les différentes fonctions du système en utilisant un pseudo langage (algorithmique).

## 3. Modélisation de la scène

Nous allons discuter précédemment divers aspects de notre solution, nous présentons la manière dont l'environnement virtuel est créé ainsi que la façon dont la scène est discrétisée sous la forme de zones contient des cellules dans le but d'en former un graphe.

Les éléments essentiels qui montrent la scène de notre modèle sont les agents et l'environnement virtuel. L'agent dans le monde virtuel est capable d'extraire des informations concernant les positions des obstacles et les autres humains virtuels dans son environnement par sa vision (perception), ces informations permettent à l'humain.

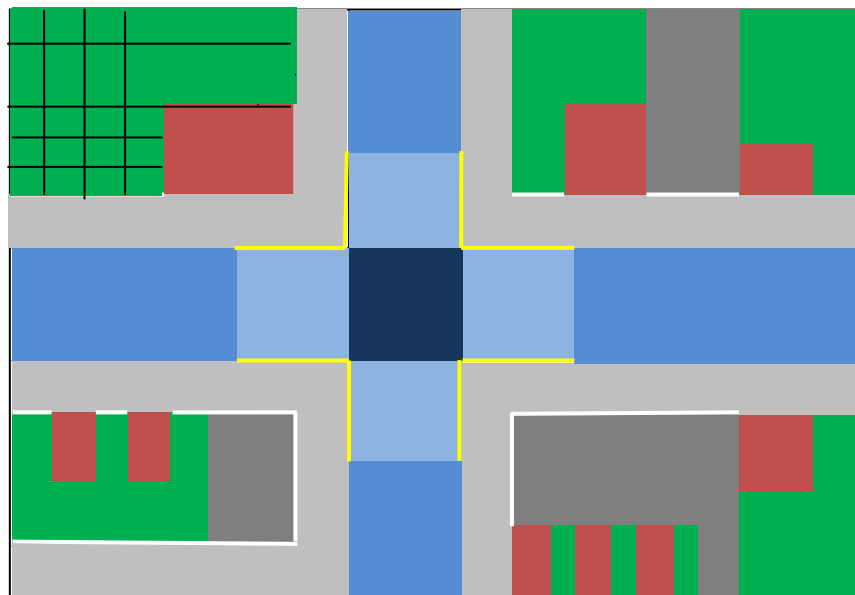
Notre modèle de simulation est une scène composé de deux éléments principaux (agents, environnement) déterminé par le réalisateur de l'animation.

### 3.1 L'environnement

L'environnement de simulation définit aussi bien la topographie des lieux que le positionnement initial des différents équipements. Celui-ci produit deux types de représentation: représentation matricielle et représentation graphique.

La représentation matricielle de l'environnement est représentée par un graphe de zones, ou chaque zone est représentée par une matrice de cellules « Matrice [longueur\_de\_scène, largeur\_de\_scène] ».

Le graphe de zone consiste à découper l'environnement en un ensemble de zones (Figure 5.1), ou chaque zone contient des cellules.



**Figure 5.1:** Le graphe de zone

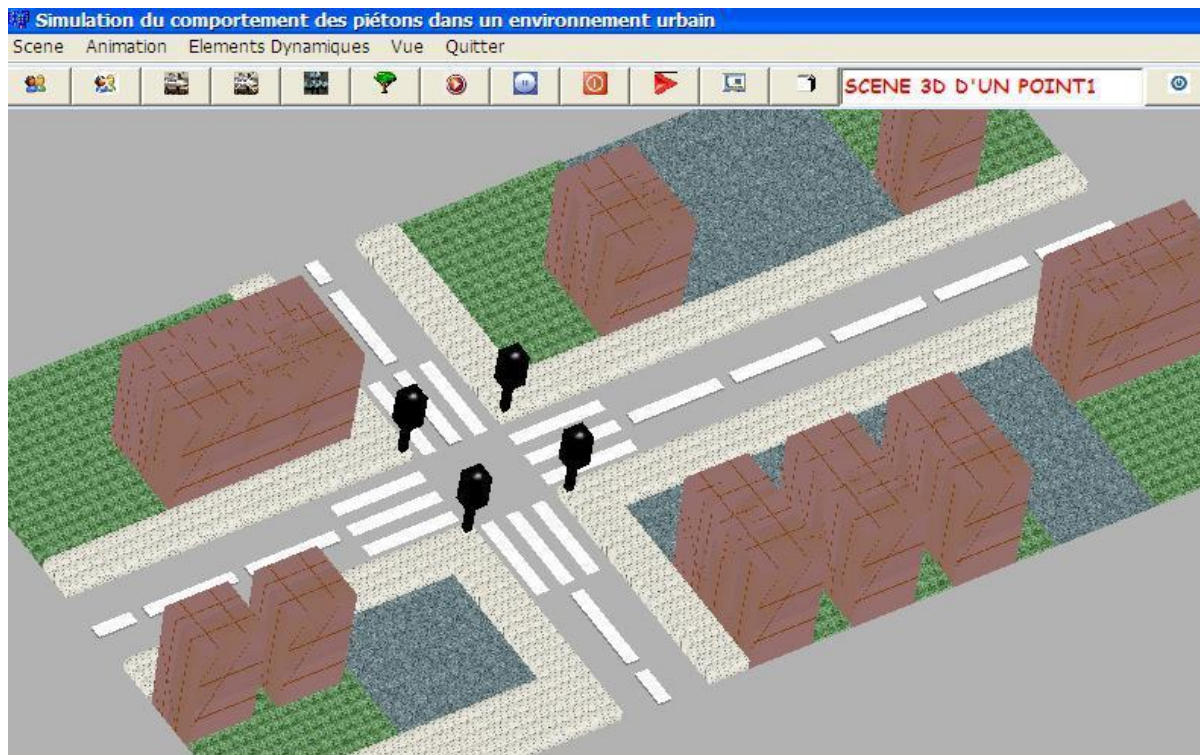
### 3.2 Le piéton

Les piétons sont les éléments essentiels dans notre simulation, ils représentent les agents virtuels. Nous avons modélisé les piétons par une combinaison de formes simples (triangle, cylindre et sphère). Pour différencier entre les individus, nous avons donné des couleurs différentes aux individus.

Notre agent est représenté par la classe individus, ou chaque agent est caractérisé par sa position  $start(x,y)$ , son but  $goal(x,y)$ ; le comportement qui décide (éviter une collision, éviter un obstacle, traverser une rue, .....

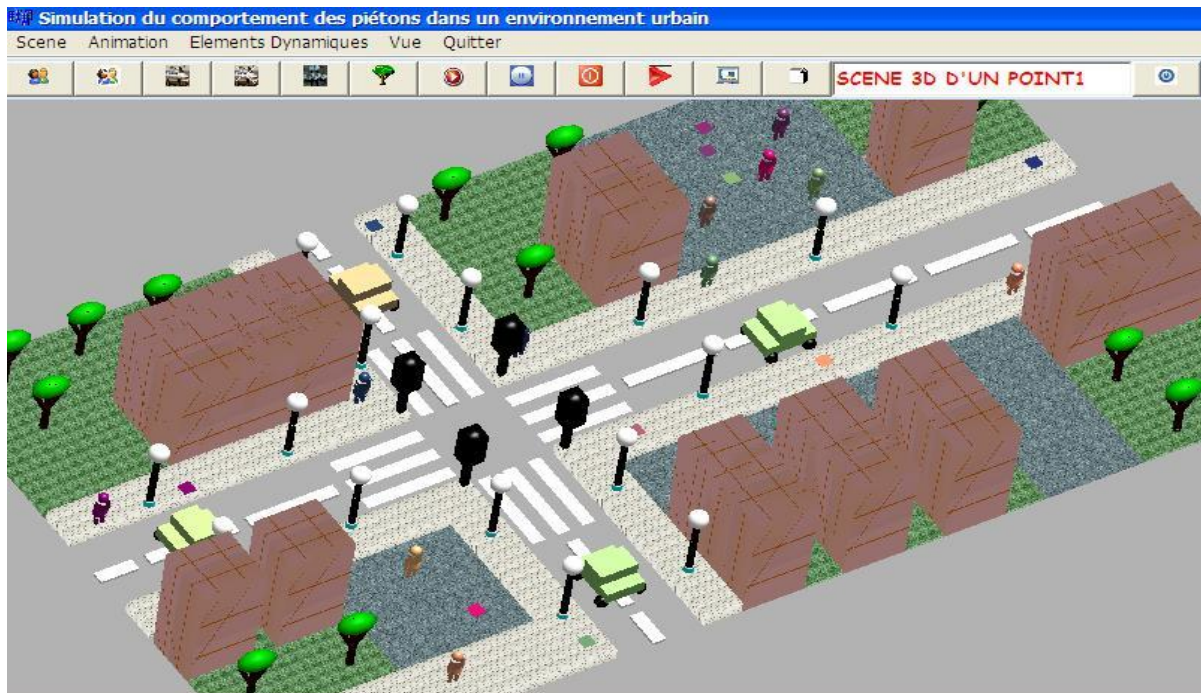
#### 4. L'interface de notre système

Quand on exécute notre logiciel, elle apparait une interface à l'utilisateur, permettant de modifier l'environnement par la création des obstacles dans la scène, l'utilisateur peut aussi créer des agents virtuels et les placer dans la scène par l'interface générée par le logiciel (Figure 5.2):



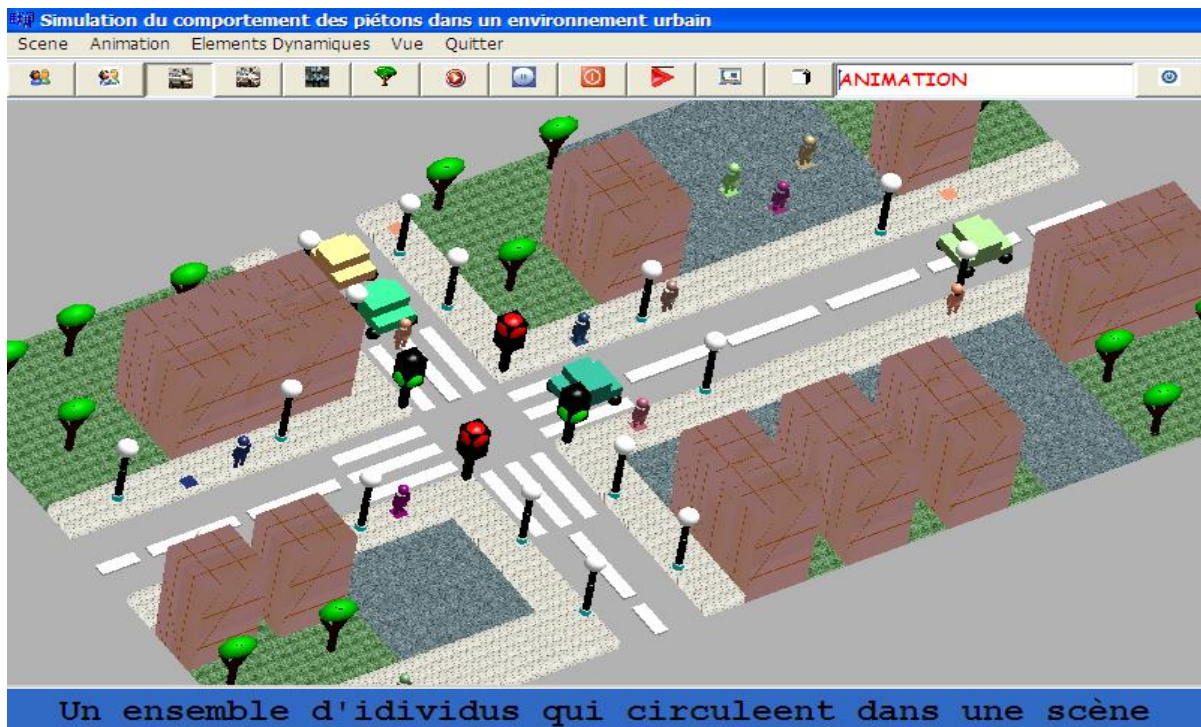
**Figure 5.2:** Représentation d'un environnement vide

À partir de cette interface, l'utilisateur peut modifier l'environnement par la création et la précision des positions des individus, des voitures, des obstacles dans la scène, Il peut ainsi continuer à interagir avec le logiciel durant cette exécution, il peut arrêter d'exécution, réinitialisant toutes les données.



**Figure 5.3:** Construction des obstacles et des piétons

Au cours de déplacement les piétons autonomes doivent marcher sur les trottoirs et doivent suivre le passage de piétons.



**Figure 5.4:** Un ensemble d'individus qui circulent dans une scène

## 5. Modélisation des comportements

Nous nous sommes donné un environnement virtuel dans lequel les individus doivent se déplacer d'un point de départ vers une position donnée représentant le but. Les piétons sont capables de calculer les chemins, éviter les obstacles, éviter les collisions.

### 5.1 Recherche du chemin

La planification de chemin consiste à rechercher un chemin optimal (généralement le plus court) entre un point de départ et un point de destination dans un environnement virtuel tout en évitant les différents obstacles qui peuvent se présenter. Traditionnellement, la planification de chemin a été résolue en utilisant un algorithme heuristique de recherche tel que le très célèbre algorithme A\* [BPW93, BT98], algorithme directement couplé à l'animation d'acteurs de bas niveau. L'utilisation de l'algorithme A\* pour la planification de chemins est basée sur un processus à deux étapes:

- ✓ La discrétisation de l'environnement virtuel: L'environnement virtuel est d'abord discrétisé pour produire une grille des cellules. Cette grille est formellement équivalente à un arbre de connectivité de facteur huit, car chaque cellule dans l'environnement a huit voisins.
- ✓ La recherche dans l'arbre de connectivité: Une Recherche dans l'arbre de connectivité est ensuite exécutée en utilisant l'algorithme A\*. Cet algorithme emploie une heuristique basée distance (distance euclidienne ou distance de Manhattan) et produit le chemin le plus court vers le point de destination. Ce chemin est calculé en différé, puisque l'algorithme A\* n'est pas un algorithme temps réel. Ainsi, l'agent est animé le long de ce chemin plus tard en différé. En conséquence, cette méthode ne peut en aucun cas être appliquée aux environnements dynamiques. L'intégration directe de l'algorithme A\* avec les primitives d'animation de bas niveau est confrontée à un certain nombre de limitations.

Les piétons autonomes sont capables de projeter automatiquement des chemins autour des obstacles statiques et dynamiques dans l'environnement virtuel. Chaque agent calcule son chemin en appliquant l'algorithme A\* dans sa région visible. La frontière entre la région courante et la prochaine devient une cible intermédiaire et temporaire. A ce stade, l'algorithme tient compte seulement des obstacles statiques pour calculer un itinéraire entre deux points libre d'obstacles.



La prochaine étape est la plus importante dans ce sens qu'elle a pour but de simuler le mouvement du piéton. Ainsi, à chaque pas de l'animation comportementale et avant d'obtenir la prochaine position, chaque agent doit traiter la prévision de collision pour éviter la collision avec les autres agents de l'environnement.

### ✓ Algorithme recherche du chemin

**Entrées** : point de départ, case de destination

**Sorties** : chemin optimale

#### Début

Ajouter le point de départ à la "liste ouverte"

#### Répéter

Cherche la case ayant le coût le plus faible dans la "liste ouverte". Elle devient la case en cours.

Passer la case en cours de la "liste ouverte" à la "liste fermée"

**Pour** les 8 cases adjacentes à la case en cours **faire**

**Si** on ne peut pas la traverser **alors** l'ignorer.

**Si** elle n'est pas dans la "liste ouverte" **alors** on l'y ajoute.

La case en cours devient le parent de cette case. On calcule les coûts de cette case.

**Si** elle est déjà dans la "liste ouverte" **alors**

On teste si le chemin passant par la case en cours est meilleur en comparant les coûts. Un coût inférieur signifie un meilleur chemin.

**Si** c'est le cas **alors**

On change le parent de la case pour devenir la case en cours, on recalcule les coûts. Si vous conservez une "liste ouverte" triée par coût, la liste doit être retriée à ce moment là.

**FinSi**

**FinSi**

#### Jusqu'à

(La case de destination est ajoutée à la "liste ouverte") **ou** (on ne trouve pas la case de destination et la "liste ouverte" est vide.)

Enregistrez le chemin. En partant de la case de destination, on remonte d'une case à son parent jusqu'à atteindre la case de départ. On aura notre chemin.

**Fin.**

## 5.2 Comportement d'évitement de collision

L'évitement de collision entre les individus d'une scène est un domaine très complexe. Il dépend de l'intelligence des individus mais dépend également des aspects sociologique et psychologique liés au comportement des êtres humains.

Le traitement de collision dépend de la position et de la distance des individus. Dans notre simulation, nous avons opté les deux comme variables d'entrée.

Les piétons doivent éviter les obstacles fixes comme les arbres et les lampadaires, et les obstacles mobiles (dynamiques) qui sont les autres piétons et les véhicules. L'évitement de collision piéton-véhicule est fait par la perception des feux. La synchronisation des feux évite les collisions entre les objets de types différents. L'évitement de collision entre les piétons est fait par le module comportemental utilisant les règles de comportements humaines utilisées dans notre système.

Pour une bonne illustration de ce comportement nous traduisons ce dernier par l'algorithme suivant:

### ✓ Algorithme traitement de collision

**Entrées :** humain virtuel1, humain virtuel2,

**Sorties :** collision traiter.

**Début**

Quel est le type de collision

**Si** confrontation **alors**

L'humain virtuel le moins prioritaire analyse et traite la situation

**Sinon**

**Si** blocage **alors**

Le piéton qui en arrière ralentie

**Sinon** //une situation de perpendicularité

L'humain virtuel le moins prioritaire analyse et traite la situation

**Finsi**

**Finsi**

**Fin.**

### 5.3 Comportement d'évitement d'obstacles

Le comportement d'évitement d'obstacles est un comportement similaire au comportement décrit précédemment, avec moins de complexité car nos humains virtuels percevaient les situations dans tels environnements comme des situations topologiques, c'est-à-dire des objets statiques.

### 5.4 Comportement attendre feu rouge

Le comportement d'attendre feu est fait dans le passage de piétons, on peut le considérer comme zone interdite aux piétons et un espace traversable pour les véhicules comme on peut le considérer inversement. Pour synchroniser entre l'accès aux passages par un élément dynamique, nous devons intervenir un objet nécessaire dans la simulation de la traversée de rue qui est le feu de circulation.

#### ✓ Algorithme attendre\_feux

**Entrées :** informations perçues.

**Sorties :** Décision.

**Début**

**Si** lieu est le point de départ **alors** Recherche du chemin. (Point de départ, point de destination)

**Si non**

**Si** lieu est le but **alors** S'arrêter

**Si non**

**Si** lieu est la zone d'attente des feux **alors**

**Si** le piéton veut traverser **alors**

**Si** le feu est rouge **alors** Traverser la rue

**Si non** S'arrêter **Fin si** //le feu est vert

**Si non** Circuler **Fin si** //il ne veut pas traverser

//suivre son chemin

**Si non** circuler **Fin si** // il n'est pas dans la zone d'attente

**Fin si**

**Fin si**

**Fin**

## 6. Analyse des résultats

L'étape suivante d'une validation est l'analyse des résultats de simulation, afin d'attester de la pertinence du modèle générateur.

Rappelons tout d'abord les modèles utilisés dans cette architecture logicielle. Celle-ci intègre bien entendu l'ensemble des modèles proposés dans les contributions.

Premièrement, la représentation de l'environnement sous forme de graphe topologique est couplée à un algorithme de détection de voisinage. Ce dernier nous permet de déterminer rapidement l'ensemble des entités voisines et visibles d'une entité de référence.

Nous utilisons l'algorithme qui se base sur une décomposition sous forme de zones.

Deuxièmement nous simulons les comportements des individus qui se déplacent dans la scène; le mouvement d'un grand nombre de personnes est important dans les situations normales comme peupler des environnements virtuels, donc, il est souvent utile de simuler des populations d'une manière autonome, ainsi les agents ont un type de connaissance et peuvent se déplacer et agir l'un sur l'autre dans cet environnement.

Chaque piéton navigue dans un environnement dynamique, vaste et plus complexe, pour accomplir un but.

Notre modèle consiste à modéliser le déplacement des individus par l'approche à base de règles qui inspire des travaux de Craig Reynolds [Rey87;Rey99].

### 6.1 L'évitement de collision

#### ✓ Entre les individus:

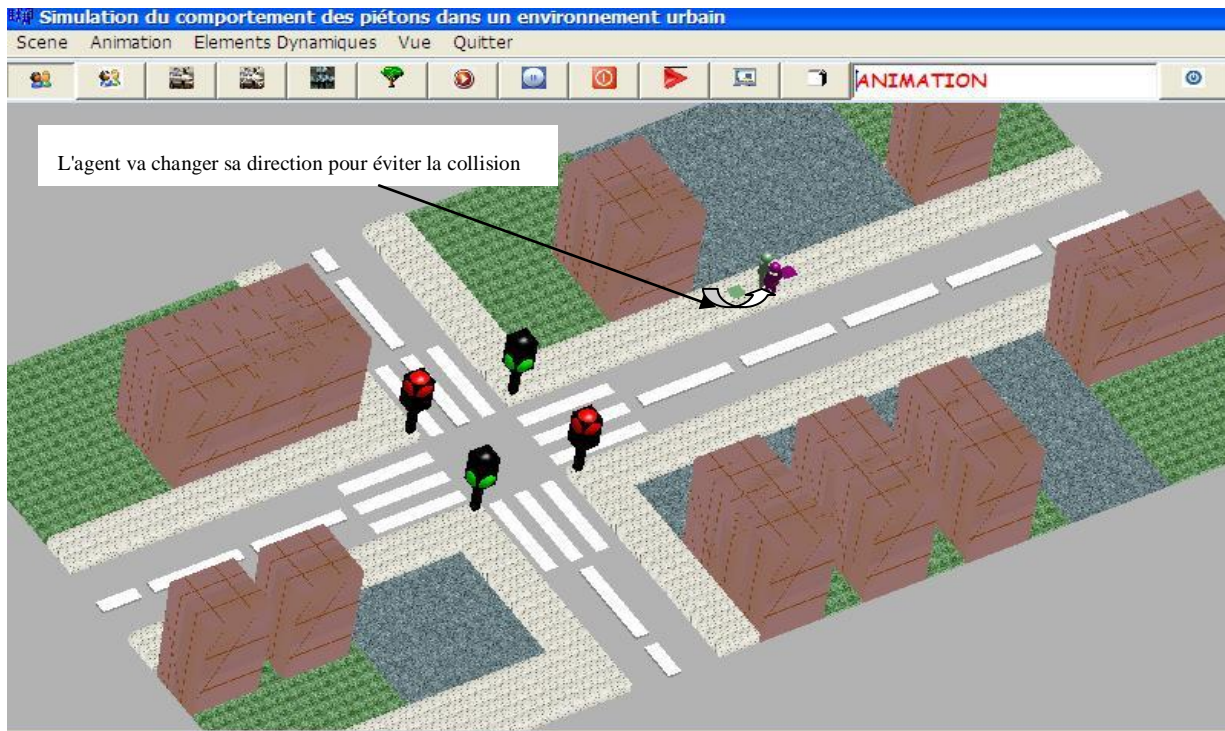
Les algorithmes comportementaux décrits ci-dessus ont été implémentés en C++ en exploitant la bibliothèque graphique OpenGL. Le système est un logiciel tridimensionnel conçu pour une utilisation temps réel. Ainsi, différentes idées et situations peuvent être simulées.

Le comportement d'éviter les collisions entre les individus d'une scène dynamique est un domaine très complexe, il dépend de l'intelligence des individus mais dépend également des aspects sociologiques et psychologiques liés au comportement des êtres humains.

Une collision pouvant être visualisée de différents angles, l'utilisateur peut créer sa scène virtuelle de différentes manières, en plaçant les obstacles et les agents partout où il veut. Il peut également choisir la destination de chaque agent permettant ainsi au système de simuler n'importe quel type de situations de collision:

- Un environnement avec des agents et des obstacles ou sans obstacles;
- Un environnement peuplé;
- Un espace peuplé pour produire un grand nombre de collisions potentielles;

La figure suivante (Figure5.5) illustre le comportement d'évitement de collision entre deux individus tel que les cellules colorées représentent les buts des agents.

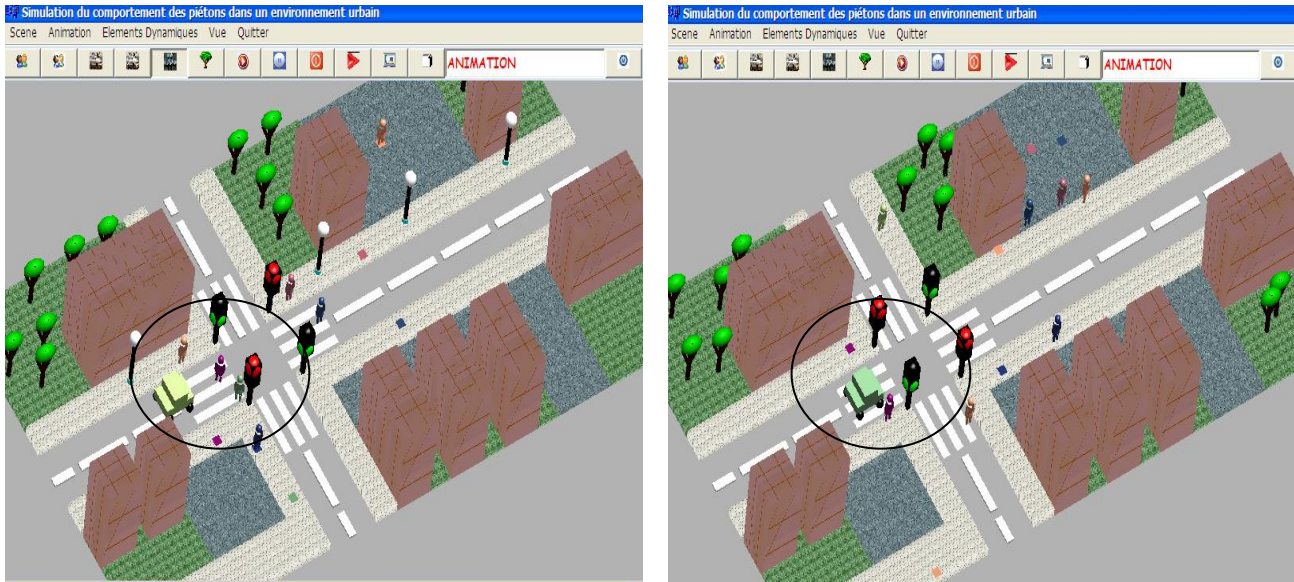


**Figure 5.5:** Le comportement de processus d'évitement de collision entre deux agents

✓ **Entre les individus et les véhicules**

Pour éviter une collision entre les véhicules et les individus, les véhicules doivent attendre que les piétons traverser la rue et les individus aussi doivent attendre que les véhicules passent pour traverser la rue, ce comportement est fait dans la passage de piétons qui peut jouer deux rôles séparés : on le considère comme zone interdite aux piétons et un espace traversable pour les véhicules comme on peut le considérer inversement. Pour synchroniser entre l'accès aux passages par un élément dynamique, nous devons intervenir un objet nécessaire dans la simulation de la traversée de rue qui est le feu de circulation.

La figure (Figure5.6) illustre le comportement d'évitement de collisions entre les individus et les véhicules.



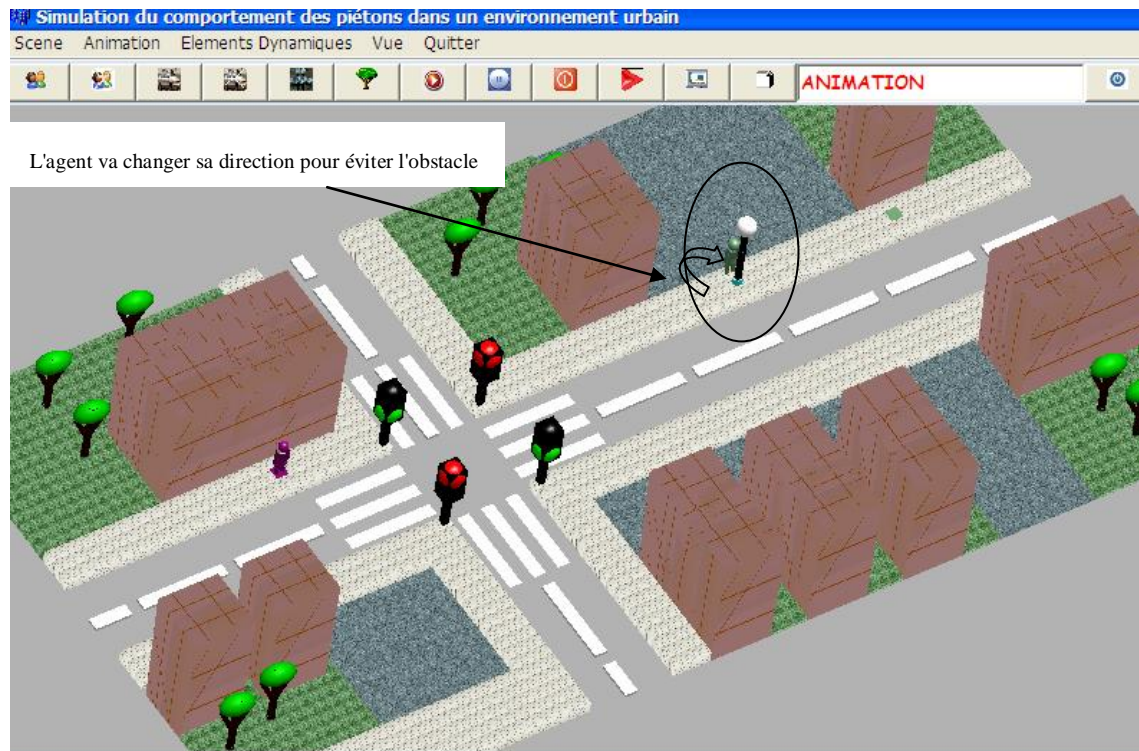
La voiture attend le couleur vert du feu

Le piéton arrête et attend le couleur rouge du feu

**Figure 5.6:** Le comportement de processus d'évitement de collision entre les véhicules et les individus

## 6.2 L'évitement d'obstacle

Le comportement d'évitement des obstacles est similaire à l'évitement de collision, il compose de deux parties la détection et l'évitement; dans le processus de détection; l'agent calcule l'angle entre sa direction et le vecteur joignant le centre de piéton et le centre d'obstacle, si cette grandeur est inférieure à la distance entre le centre d'agent et le centre d'obstacle, alors il y'a un obstacle à éviter. Aussi l'évitement d'obstacle est influencé par l'espace personnel, parce que l'agent change sa direction, et la nouvelle direction dépend de l'espace personnel de l'agent.



**Figure 5.7:** Le comportement de processus d'évitement d'obstacle

## 7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons expliqué l'implémentation de notre modèle qui peut simuler le comportement humain basé sur des théories de la sociologie et de la psychologie de l'être humain. Nous commençons par l'architecture logicielle de ce modèle, par la suite nous avons présenté les structures les plus importantes pour modéliser l'environnement, et pour modéliser le piéton.

Nous avons concentré notre effort sur les techniques d'évitement de collision ainsi que sur la recherche de chemin dans un environnement dynamique. Ces deux techniques rendent les simulations plus cohérentes et plus réalistes.

# *Conclusion générale*

Nous avons présenté dans ce mémoire un modèle de simulation de mouvement de piétons dans un environnement virtuel urbain. L'environnement est peuplé par un ensemble de piétons et des véhicules. Notre système utilise un ensemble d'outils pour manipuler la base de données urbaine qui est utilisée par les piétons pour ses mouvements.

Dans ce mémoire, on a étalé les différents concepts concernant l'animation comportementale des piétons dans un environnement urbain, en commençant par une définition des environnements urbains. Une définition du modèle comportemental a été présentée, suivie d'une simulation de comportement de navigation réactive de piéton, et les algorithmes de planification et le processus d'évitement de collision.

La simulation d'un environnement urbain est similaire au système robotique, en effet, leur étude dans l'environnement urbain a été effectuée dans la deuxième partie du thème. Un modèle de ville virtuelle, constitué de six composants est pris comme exemple.

Le but de tout système d'animation comportementale est d'arriver à une simulation plus réaliste. Nous avons plusieurs perspectives d'évolution concernant notre modèle de simulation. Tout d'abord, nous voudrions compléter le modèle de piéton virtuel en y intégrant une procédure d'évitement des collisions entre les piétons plus efficace. Une telle procédure doit tenir en compte des priorités des individus entre eux et des comportements sociaux et psychologiques de ces individus.

En effet, nous utilisons actuellement un modèle simple d'évitement de collision qui comporte trois points faibles d'un point de vue réalisme : l'oscillation de la direction de déplacement en réaction à une collision, l'absence totale de prédiction de collision, et enfin la non prise en charge de l'aspect social (du point de vue des règles de comportement aussi bien de la formation de groupes ou d'individus).



## *Conclusion Générale*

---

La dernière partie de ce travail est consacrée à la conception et la réalisation d'un outil de simulation des piétons dans un environnement urbain en se basant sur les concepts définis précédemment, les résultats du système ainsi présentés.

Parmi nos perspectives nous pouvons signaler l'étude du comportement des piétons imprudents, tout en prenant aussi en considération la communication entre le piéton et le conducteur, et en conséquence prendre en compte les deux modèles : *géométrique* et *capacité motrice*.

## Bibliographie

- [ACF01] Arıkan (O.), Cheney (S.) et Forsyth (D.A.). *Efficient multi-agent path planning*. Dans *Computer Animation and Simulation.*, pp. 151-162, Springer-Verlag, 2001.
- [Arn94] Arnaldi (B.). *Modèle physiques pour l'animation*. Habilitation à diriger des recherches, université de Rennes I, 1994.
- [Avr08] Avril (Q.). *Peuplement Automatisé de Bases Géométriques Urbaines*. Rapport de stage de Master Recherche. Université de Rennes I, 6 Juin 2008.
- [BB+97] Boulic (R.), Becheiraz (P.), Emering (L.) et Thalmann (D.). *Integration of Motion Control Techniques for Virtual Human and Avatar Real-Time Animation*. Lausanne, Switzerland, pp. 111-118, ACM VRST'97, 1997.
- [BCN97] Bouvier (E.), Cohen (E.) et Najman (L.). *From crowd to airbag deployment: particle systems, a new paradigm of simulation*. Dans: *Journal of Electronic Imaging*, vol. 6, n1, pp. 94-107, Janvier 1997.
- [BDD+03] Burkhardt (J.M.), Donikian (S.), Duthen (Y.), Héguy (O.), Lourdeaux (D.), Morineau (T.), Parenthoën (M.), Sanza (C.) et Tisseau (J.). *Humain virtuel: vers un humain synthétique temps-réel aussi vrai que nature*. Thème 5: Comportements humains individuels et collectifs, 2003.
- [BGL97] Benford (S.D.), Greenhalgh (C.M.) et Lloyd (D.). *Crowded Collaborative Virtual Environments*. Proceedings of ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, Atlanta, Georgia, US, pp. 22-27, Mars 1997.
- [BHT94] Boulic (R.), Huang (Z.), et Thalmann (D.). *Goal Oriented Design and Correction of Articulated Figure Motion with the TRACK System*. *Journal of Computer and Graphics*, v.18, n.4, pp. 443-452, Pergamon Press, Octobre 1994.

- [BL91] Barraquand (J.) et Latombe (J.C.). *Robot motion planning: a distributed representation approach*. International, Journal of Robotics Research, pp. 628–649, 1991.
- [BLA02] Burçhan (O.), Lien (B.J.) et Amato (N.M.), *Roadmap-based flocking for complex environments.*, 10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG'02), pp.104, 2002.
- [Blu96] Blumberg (B.M.). *Old Tricks, New Dogs : Ethology and Interactive Creatures*. PhD thesis, Cambridge, MA, 1996.
- [Blo81] Boles (W.). *Planning pedestrian environments: A computer simulation model*. Man-Environment Systems, vol. 11, pp. 41–56, 1981.
- [BMO+03] Braun (A.), Musse (S.R.), de Oliveira (L.P.L.) et Bodmann (B.E.J.). – *Modeling individual behaviors in crowd simulation*. Dans: *CASA2003, 16th International Conference on Computer Animation and Social Agents*. pp. 143-148. Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, USA, Mai 2003.
- [Bro91] Brook (R.A.). *Intelligence without reason*. Proceedings of 12th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, Sydney, Australia, pp. 569-595, August 1991.
- [BT98] Becheiraz (P.) et Thalmann, (D.). *A Behavioral Animation System for Autonomous Actors personified by Emotions*. Dans: Proceedings of the First Workshop on Embodied Conversational Characters (WECC '98), Lake Tahoe, California. 1998.
- [BW95] Badler (N.I.) et Webber (B.L.). *planning and parallel transition networks: animation's new frontiers*, In Pacific Graphics '95, 1995.
- [BY98] Boissonnat (J.D.) et Yvinec (M.). *Algorithmic Geometry*. Cambridge University. Press, 1998.
- [CKP95] Creamer (J.), Kearmey (J.) et Papeles (Y.E.). *HCSM: A frame work for behavior and scenario in virtual environnement*. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation. 1995.
- [CLS03] Choi (M.G.), Lee (J.) et Shin (S.Y.). *Planning biped locomotion using motion capture data and probabilistic roadmaps*. ACM Transactions on Graphics, 22(2), pp. 182-203, 2003.

- [DH97]** Doyle (P.) et Hayes-Roth (B.). *Agents in Annotated Worlds*. Report No KSL 97-09, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, California, 1997.
- [Don97]** Donikian (S.). *Vuems: a virtual urban environment modeling system*. Dans: Computer Graphics International'97. Hasselt-Diepenbeek, Belgium, Juin 1997.
- [Don00]** Donikian (S.). *Coup d'oeil sur ... L'animation comportementale*. Le Bulletin de l'AFIG, Numéro 11, 2000.
- [Don04]** Donikian (S.), *modélisation, contrôle et animation d'agents virtuels autonomes évoluant dans des environnements informés et structure*. Habilitation à diriger des recherches, IRISA/FSIC, Rennes, 2004.
- [FBT99]** Farenc (N.), Boulic (B.) et Thalmann (T.). *An informed environment dedicated to the simulation of virtual human in urban context*. Dans: Eurographics '99. Milan, September 1999.
- [Feu00]** Feurtey (F.). *Simulating the collision avoidance behavior of pedestrians*, Master thesis, Tokyo, 2000.
- [Fir82]** Firth (D.E.). *Pedestrian behaviour*, chap. 2. A.J Chapman and M.Wadw and H.C. Foot, 1982.
- [FMS+99]** Farenc (N.), Musse (S.R.), Schweiss (E.), Kallmann (M.), Aune (O.), Boulic (R.) et Thelmann (D.). *A paradigm for controlling virtual humans in urban environment simulations*. Applied Artificial Intelligence Journal-Special Issue on Intelligent Virtual Environments, 1999.
- [Fou06]** Foudil (C.). *Animation comportementale: Simulation de foules d'humains virtuels*. Thèse de doctorat, Université de Biskra, Decembre 2006.
- [Gile86]** Gibson (J.J.). *The ecological approach to visual perception*. NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc, Hillsdale, 1986.
- [Gof71]** Goffman (E.). *Relations in public : microstudies of the public order*. New York: livres de base, 1971.
- [HB06]** Hartman (C.) et Benes(B.). *Autonomous boids : Research articles*. Computer Animation and Virtual Worlds, 17(3,4), pp. 199-206, 2006.

- [Hel01]** Helbing (D.). *Traffic and related self-driven many particle systems*. Reviews of Modern Physics, n 73, pp. 1067-1141, 2001.
- [HFV00]** Helbing (D.), Farkas (I.) et Vicsek (T.). *Simulating Dynamical Features of Escape Panic*. Dans: Nature, vol. 407, pp. 487-490, 2000.
- [HK+99]** Hoff (K. E.), Keyser (J.), Lin (M.), Manocha (D.) et Culver (T.). *Fast computation of generalized Voronoi diagrams using graphics hardware*. Computer Graphics 33, pp. 277-286, 1999.
- [HK02]** Hostetler (T. R.) et Kearney (J. K.). *Strolling down the avenue with a few close friends*. Dans: Third Irish Workshop on Computer graphics, pp. 7-14. Dublin, Ireland, March 2002
- [KT98]** Kallmann (M.E.), Thalmann (D.). *Modeling objects for interaction tasks*. Dans: Eurographics Workshop on computer animation and simulation 98, Lisbon, September 1998.
- [Kuf98]** Kuffner (J.J.). *Goal-directed navigation for animated characters using real-time path planning and control*. Lecture Notes in Computer Science, 1537, pp. 171–179, 1998.
- [Lam03]** Lamarche (F.). *Humanoïdes virtuels, réaction et cognition : une architecture pour leur autonomie*, Thèse de PhD, Université de Rennes I, décembre 2003.
- [LD04]** Lamarche (F.) et Donikian (S.). *Crowd of virtual humans: a new approach for real time navigation in complex and structured environments*. Dans: In Computer Graphics Forum, vol. 23, pp. 509-518, 2004.
- [Mal97]** Hanspeter A. Mallot(H.A.). *Behavior-oriented approaches to cognition : Theoretical perspectives*. Theory in biosciences, 07 Janvier 1997.
- [MBC+98]** Musse (S.R.), Babski (C.), Capin (T.) et Thalmann (D.). *Crowd modeling in collaborative virtual environments*. - Dans: ACM VRST'98. Taiwan, 1998.
- [MCP+03]** Moulin (B.), Chaker (W.), Perron (J.) et Pelletier (P.). *Mags project: Multiagent geosimulation and crowd simulation*. Dans: COSIT 2003, éd. par Kuhn (W.), Worboys (M.F.) et Timpf (S.), pp. 151–168. – Springer-Verlag, 2003.

- [MG94] Meyer (J.A.), Guillot, (A.). *From SAB90 to SAB94: Four Years of Animat Research*, 1994.
- [Mor98] Moreau (G.). *Modélisation du comportement pour la simulation interactive: application au trafic routier multimodal*. Rennes, Thèse de doctorat, Université de Rennes I, Novembre 1998.
- [MT97] Musse (S.R.) et Thalmann (D.). *A model of human crowd behavior: Group inter-relationship and collision detection analysis*. Dans: *Computer Animation and Simulation '97*. pp. 39-51. – Springer Verlag. 1997.
- [New90] Newell (A.). *Unified theories of cognition*. Harward University Press, 1990.
- [Nil82] N.J. Nilsson. *Principles of artificial intelligence*. Springer-Verlag, 1982.
- [NT97] Noser (H.) et Thalmann (D.). *Sensor based synthetic actors in a tennis game simulation*. Dans: *Computer Graphics International'97*. pp. 189-198. - Hasselt, Belgium, Juin 1997.
- [Ove02] Overmars (M. H.). *Recent developments in motion planning*. Dans: *International Conference on Computational Science (3)*. pp. 3-13, 2002.
- [PLS03] Pettré (J.), Laumond (J.P.) et Siméon (T.). *A 2-stages locomotion planner for digital actors*. Dans: *Proc. of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA'03)*.pp. 258-264, 2003.
- [PAB07] Pelechano (N.), Allbeck (J. M.) et Norman (I. B.). *Controlling individual agents in high-density crowd simulation*. Association for Computing Machinery. pp. 99-108, 2007.
- [Par07] Paris (S.). *Caractérisation des niveaux de services et modélisation des circulations de personnes dans les lieux d'échanges*. Thèse de Doctorat, Renne1, Octobre 2007.
- [Pes71] Peschl (I.). *Flow capacity of door openings in panic situations*. *BAUN*, vol. 26, n2, pp. 62-67, 1971.
- [PPD07] Paris(S.), Pettré(J.), et Donikian (S.). *Pedestrian reactive navigation for crowd simulation : a predictive approach*. Eurographics, 2007.

- [Rey87]** Reynolds (C.W.). *Flocks, herds and schools: a distributed behavioural model*. Dans: SIGGRAPH'87, Vol. 21(4) of Computer Graphics, pp 25-34, ACM Press, Anaheim (USA), 1987.
- [Rey88]** Reynolds (C.W.). *Not bumping into things*. In : *course on Physically Based Modeling at SIGGRAPH 88*. Atlanta, Georgia, 1988.
- [Rey99]** Reynolds (C. W.). *Steering Behaviors For Autonomous Characters*. *GDC 99*. pp. 763-782 A. Yu (Ed.) Miller Freeman, San Fransisco, 1999.
- [Rey00]** Reynolds (C.W.). *Interaction with Groups of Autonomous Characters*. Dans: Game Developers Conference, 2000.
- [RMT90]** Renault (O.), Magnenat-Thalmann (N.) et Thalmann (D.). *A vision based approach to behavioural animation*. Journal of Visualization and Computer Animation, pp. 18-21vol. 1, n 1, 1990.
- [RQ98]** Relieu (M.) et Quéré (L.). *Les Risques urbains: Acteurs, systèmes de prévention*, Anthropos, Paris. pp ,33-46, 1998.
- [RTJ89]** Roth-Tabak (Yuval) et Jain (Ramesh). *Building an environment model using depth information*. *Computer*, juin1989, pp. 85-90.
- [SC06]** Stylianou (S.) et Chrysanthou(Y.). *Crow self-organisation, streaming an short path smoothing*. Journal of WSCG - Science Press, 14, 2006.
- [SGC04]** Sung (M.), Gleicher (M.) et Chenney (S.). *Scalable behaviors for crowd simulation*. *Comput. Graph. Forum*, 23(3) .pp. 519-528, 2004.
- [SMG99]** Schweiss (E.), Musse (S. R.) et Garat (F.). *An Architecture to Guide Crowds based on rule-based systems*. *Autonomous Agents'99*, Seattle, Washington, USA. 1999.
- [ST05]** Shao (W.) et Terzopoulos (D.). *Autonomous Pedestrians*. Dans: Eurographics / ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation. USA., pp. 19-28, 2005.
- [ST07]** Shao (W.) et Terzopoulos (D.). *Autonomous pedestrians*. *Graphical Models*, 69(5-6) .pp. 246-274, 2007.

- [TD00] Thomas (G.) et Donikian (S.). *Virtual humans animation in informed urban environments*. Dans: *Computer Animation*. pp. 112–121. – Philadelphia, PA, USA, Mai 2000.
- [TD03] Tom (A.), Denis (M.). *Referring to landmark or street information in route directions: What difference does it make ?* Dans *Spatial Information Theory*, volume 2825/2003, pp.362-374. Springer Berlin / Heidelberg, 2003.
- [Tho99] Thomas (G.). *Environnements virtuels urbains: modélisation des information nécessaires à la simulation de piétons*. – Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, 1999.
- [TLC02] Tecchia(F.), Loscos(C.) et Chrysanthou(Y.). *Visualizing crowds in real-time*. *Computer Graphics Forum*, 21(4),pp.753-765, 2002.
- [TMK99] Thalmann (D.), Musse (S.R.), Kallmann (M.). *Virtual Humans' Behaviour: Individuals, Groups, and Crowds*, Conference on Digital Media Futures, 1999, Bradford, UK, 13-14 April, 1999.
- [TT94] Tu (X.) et Terzopoulos (D.). *Artificial Fishes: physics, locomotion, perception, behaviour*. Dans: *SIGGRAPH 94 Conference Proceedings*, pp 43-50, Orlando, FL, USA, 1994.
- [Tur84] Turner (G.E.). *Simulation of pedestrian movement in means of egress*. *Journal of Architecture and Planning Research*, vol. 1, n 3, pp. 181-190. Octobre 1984.
- [War95] Warren (W.H.): *Perception of Space and Motion*, chap. Self-Motion: Visual Perception and Visual Control, pp. 263-325. Academic Press, 1995.
- [WL+02] DavidWaller(D.), Loomis(J.M.), Golledge(R.G. et Beall(A.C.). *Place learning in humans : The role of distance and direction information*. *Spatial Cognition et Computation*, 2(4), pp. 333-354, 2002.
- [Yam98] Yamori (K.). *Going with the flow: Micro-macro dynamics in the macro behavioral patterns of pedestrian crowds*. *Psychological Review*, vol. 105, n3, pp. 530-557.1998.



# Résumé

Une animation comportementale est constituée d'acteurs autonomes (conducteur de voiture ou de camion, piéton, cycliste) évoluant dans un environnement virtuel (la ville). Ces acteurs sont capables de percevoir, de décider et d'agir. L'immersion d'acteurs autonomes dans des environnements virtuels nécessite une représentation de l'environnement qui ne se limite pas à la géométrie. La représentation de l'environnement doit contenir les informations nécessaires au fonctionnement des modèles perceptifs et décisionnels des entités.

Ce mémoire présente une architecture complète pour effectuer des simulations de foules dans un environnement virtuel urbain. Chaque entité est simulée de manière autonome. Nous présentons l'ensemble des étapes nécessaires à un tel processus.

Premièrement, nous proposons une représentation de l'environnement urbain. Ensuite, nous proposons un moteur de description des objets interactifs de la simulation, permettant d'enrichir le potentiel comportemental des entités simulées. Nous mettons l'accent sur ces interactions par l'intégration des objets interactifs directement dans la procédure de planification de chemin de l'humain virtuel. Cette dernière, basée sur une connaissance de l'environnement, prend en compte plusieurs critères de décisions simultanément. Finalement, nous montrons comment l'ensemble de ces modules s'intègre dans notre architecture pour obtenir une plateforme de simulation de foules d'humains virtuels dans un environnement urbain, formé principalement de piétons et de véhicules.

---

# *Abstract*

Behavioural animation is based on wandering autonomous agents (like pedestrians, car or truck drivers, cyclists) into a virtual environment. These agents are aimed to perceive their environments, to decide what they ought to do and act in a corresponding way to achieve specific tasks. Perception is all the more easy to simulate as the representation of the environment differs from simple geometric informations. For this issue, we have to provide high-level informations on the environment directly usable by perception and decision modules.

This work presents a complete architecture in order to effect simulation of crowd into virtual urban environment. Each entity is simulated with independent manner. We present some steps necessary for such process. First, we offer a representation of urban environment. Then we offer a motive of description interactive objects of simulation, permitting to enrich the behaviour's potential of simulated entity. We put the accent concerning this interaction about integration of interactive objects directly into procedure of planning of virtual human's path. This one is based on knowledge of environment, take profit several tests of decision simulations. Finally we displays how some of this modules are integrated in our architecture to obtain a base of simulation of virtual human's crowd into virtual urban environment, formed principally of pedestrian and convoy.