

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences Exactes, des sciences de la Nature et de la Vie

Département d'Informatique

N° d'ordre :.....

Série :.....



Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en
Informatique

Option : Data Mining et Multimédia

Titre :

Modélisation du comportement de piétons en milieu urbain

Par :

M^{elle}. AblahEDHOUD

Soutenu publiquement le : . . . - . . . -2014 devant le jury formé de :

-

Dr. Foudil CHERIF

-

-

Remerciement

Au terme de ce travail :

Je remercie, Tout d'abord, ALLAH pour la volonté, la force, la santé et la patience qu'il m'a donné afin de réaliser ce travail.

Je tiens à adresser mes remerciements au Dr. Foudil CHERIF, et lui exprimer toute ma reconnaissance pour son encadrement, sa confiance et sa patience, ainsi que pour ses remarques pertinentes et ses contributions considérables tout au long de la réalisation de ce travail. J'ai eu l'honneur et le plaisir de travailler sous sa direction pendant mon projet de Magister.

J'aimerais également remercier le professeur DJEBABRA Mébarek de l'Université Hadj-Lakhdar de Batna pour ses précieux conseils, ses remarques pertinentes et son aide pendant mes études.

Mes remerciements sont également adressés à tous les membres de Jury qui m'ont fait un grand honneur en acceptant l'évaluation de ce modeste travail.

Je n'oublie pas enfin d'adresser mes vifs remerciements à mes amies et mes collègues.

Résumé - La modélisation des piétons dans un environnement urbain prend un grand espace dans la recherche en psychologie, architecture et informatique. La compréhension des tâches effectuées par les piétons nécessite une étude de l'architecture de l'espace navigable et les différentes configurations spatiales qui figurent dans l'environnement urbain. Dans ce contexte, notre travail consiste à modéliser et à simuler le comportement de wayfinding dans un environnement urbain non familier à l'aide de la syntaxe spatiale. Notre objectif est, donc, d'analyser l'espace urbain et la structure des configurations spatiales pour découvrir les zones de circulation des personnes. Pour atteindre cet objectif, nous avons modélisé et simulé le comportement de wayfinding et à l'issue de cette modélisation et simulation, nous avons effectué une comparaison de deux paramètres locaux (l'intégration locale et la connectivité) pour voir quel est le paramètre le plus efficace, le plus répondu aux besoins de piéton. Les résultats de notre travail montrent que la majorité des piétons préfèrent les routes droites et les plus courtes

Nos résultats, qui confirment ceux des études empiriques réalisées dans ce domaine, sont obtenus grâce à l'usage de la plateforme Repast Symphony qui nous donne la possibilité d'utiliser la notion d'agent pour modéliser les piétons et aussi l'utilisation des données SIG pour accéder aux différentes routes d'une ville virtuelle qui est réalisée par une shapefile d'une ville réelle. Ces premiers résultats de notre travail représentent, à notre avis, une initiative prometteuse pour utiliser la technique de la syntaxe spatiale dans la modélisation des piétons pour cause du rôle important des configurations spatiales dans l'orientation des gens.

Mots-clés – Wayfinding, syntaxe spatiale, environnement urbain, environnement non familier, modélisation, piétons.

Abstract - Pedestrian Modeling takes a large space in the field of architecture and computer science. To understand the task performed by pedestrians we must study the architecture of the navigable space and different spatial configurations contained in the urban environment. In this context, our work is to study, understand, model and simulate the behavior of wayfinding in an unfamiliar urban environment using the space syntax technique. Therefore, our goal is to analyze the urban space and the structure of spatial configurations to discover areas of movement. To achieve this goal, we modeled and simulated the behavior of wayfinding and at the end of this modeling and simulation, we performed a comparison of two local parameters (local integration and connectivity) to see what is the parameter more efficient, more responsive to the needs of pedestrians. The results of our work shows that the majority of pedestrians prefer straight roads and shorter.

Our results, which confirm empirical studies in this area are achieved by using Repast Symphony platform that gives us the ability to use the notion of agent to model pedestrians and also the use of data GIS to access the different routes of a virtual city that is made by a shapefile of a real city. These first results of our work are, in our opinion, a promising initiative to use the technique of spatial syntax in pedestrians modeling because of the important role of spatial patterns in guiding people.

Key-words – Wayfinding, space syntax, urban environment, unfamiliar environment, pedestrian, modeling.

ملخص- انشاء نموذج للمارة في بيئة حضرية يأخذ مساحة كبيرة في بحوث الهندسة المعمارية وعلوم الكمبيوتر. وفهم المهام التي يقوم بها المارة يتطلب دراسة المساحة المستعملة وتكويناتها المختلفة في البيئة الحضرية. في هذا المعنى عملنا على دراسة وفهم، ووضع نموذج لمحاكاة سلوك المارة في العثور على المسار في بيئة حضرية غير مألوفة باستخدام "space syntax". وبالتالي، فإن هدفنا هو تحليل الحيز الحضري وهيكل التشكيلات المكانية لاكتشاف مجالات حركة المارة لتحقيق هذا الهدف، عملنا على محاكاة سلوك العثور على المسار للمقارنة بين معيارين من معايير "space syntax": الاندماج المحلي والربط، لنرى ما هو المعيار الأكثر فعالية، وأكثر تلبية لاحتياجات المارة من حيث سلوك العثور على المسار، في الأغلبية المارة يفضلون الطريق الأقل زوايا، وكذلك الاقصر مسافة وفترة زمنية ممكنة. نتائجنا تؤكد الدراسات التجريبية في هذا المجال وتوصلنا اليها باستخدام Repast Simphony الذي اعطانا القدرة على استخدام مفهوم الوكيل من اجل انشاء نموذج للمارة وأيضا استخدام بيانات نظم المعلومات الجغرافية للوصول إلى مختلف طرق المدينة التي تم انشائها اعتمادا على مدينة حقيقية. هذه النتائج الأولى لعملنا هي، في رأينا، مبادرة واعدة لاستخدام هذه التقنية "space syntax" في انشاء نموذج للمارة نظرا للدور المهم في توجيه الناس.

الكلمات المفتاحية: العثور على المسار، space syntax؛ البيئة الحضرية؛ نموذج للمارة؛ بيئة غير مألوفة.

Sommaire

Liste des Figures.....	x
Introduction générale.....	12
Chapitre 1 : Présentation de L'environnement	14
1. Présentation de L'environnement	3
1.1. Introduction	3
1.2. L'environnement virtuel.....	3
1.2.1. Représentations exactes de l'environnement	3
1.2.1.1. Triangulation de Delaunay.....	3
1.2.1.2. Triangulation de Delaunay contrainte.....	4
1.2.1.3. Triangulation de Delaunay filtrée.....	4
1.2.2. Représentations approximatives de l'environnement.....	5
1.2.2.1. Modèles à base de grilles	6
1.2.2.2. Les cartes de cheminement	6
1.2.2.3. Graphe de visibilité.....	7
1.2.2.4. Diagramme de Voronoï généralisé.....	7
1.2.2.5. Cartes de cheminement probabilistes	7
1.2.2.6. Le modèle de champs de potentiels	8
1.3. L'Environnement urbain	9
1.3.1. Les voies.....	10
1.3.2. Les quartiers	11
1.3.3. Les limites	11
1.3.4. Les points de repères.....	12
1.3.5. Les nœuds.....	12
1.4. Conclusion.....	13
Chapitre 2 : La théorie de la syntaxe spatiale	14
2. La théorie de la syntaxe spatiale.....	15
2.1. Introduction	15

2.2.	Les concepts de base dans la syntaxe spatiale	15
2.2.1.	La configuration	15
2.2.2.	Espace convexe.....	16
2.2.3.	Espace axial ou ligne axiale	16
2.2.4.	Espace isovist (Isovist).....	16
2.2.5.	Carte convexe	16
2.2.6.	Carte axiale.....	17
2.2.7.	Carte Isovist.....	17
2.2.8.	Graphe	17
2.2.9.	La perméabilité.....	17
2.2.10.	Pas syntaxique	18
2.2.11.	Profondeur	18
2.2.12.	Graphe justifié	19
2.3.	Les paramètres de la syntaxe spatiale	20
2.3.1.	Connectivité.....	20
2.3.2.	L'intégration globale	20
2.3.3.	Valeur de contrôle.....	21
2.3.4.	Choix global	21
2.4.	L'analyse dans la syntaxe spatiale	21
2.4.1.	La carte axiale et l'intégration spatiale	21
2.4.2.	L'Isovist	22
2.4.3.	Un graphe de visibilité	23
2.4.4.	Un graphe d'isovists	23
2.4.5.	Le concept d'aires locales	23
2.4.6.	Analyse des graphes de visibilité et des graphes d'Isovist	23
2.5.	Conclusion.....	24
	Chapitre 3 : Le processus de wayfinding.....	25
3.	Le processus de wayfinding	26

3.1.	Introduction	26
3.2.	La recherche en wayfinding	27
3.2.1.	Wayfinding comme une activité cognitive.....	28
3.2.1.1.	Les modèles théoriques / Littérature de compétence.....	28
3.2.1.2.	Littérature de performance/ les recherches empiriques	30
3.2.2.	Les modèles écologiques de wayfinding.....	32
3.3.	Modélisation du comportement de wayfinding	33
3.3.1.	La cognition spatiale humaine.....	33
3.3.2.	Les cartes cognitives	34
3.3.3.	Les heuristiques de navigation	37
3.3.3.1.	Les grandes heuristiques	37
3.3.3.2.	Les axiomes d'Hochmair	40
3.3.4.	Wayfinding.....	40
3.3.5.	Définition du wayfinding	41
3.3.6.	Les aptitudes individuelles et des connaissances spatiales pour wayfinding.....	43
3.3.7.	Le raisonnement spatial et la prise de décision	44
3.3.8.	Les modèles informatiques de wayfinding.....	45
3.4.	Conclusion.....	47
	Chapitre 4 : Wayfinding à base de la syntaxe spatiale	49
4.	Wayfinding à base de la syntaxe spatiale.....	50
4.1.	Introduction	50
4.2.	ABM : Modélisation à Base d'Agent.....	52
4.2.1.	Définition	52
4.2.2.	Environnement.....	52
4.2.3.	Agents autonomes.....	52
4.3.	Le modèle proposé	53
4.3.1.	L'architecture globale du modèle	53
4.3.2.	Les paramètres de la syntaxe spatiale utilisés	59

4.3.2.1.	L'intégration locale.....	60
4.3.2.2.	La connectivité	61
4.4.	Le processus de wayfinding	63
4.5.	Conclusion.....	67
Chapitre 5 : Implémentation et résultats.....		68
5.	Implémentation et résultats.....	69
5.1.	Introduction	69
5.2.	Repast Symphony	69
5.2.1.	Implémentation d'un modèle avec Repast Symphony	69
5.2.1.1.	Agents	69
5.2.1.2.	Environnement	69
5.2.1.3.	Contexte	70
5.2.1.4.	Projection	70
5.3.	Modélisation de l'environnement urbain virtuel	70
5.4.	Wayfinding	73
5.5.	Conclusion.....	79
Conclusion Générale et perspectives.....		80
Références bibliographiques.....		83

Liste des Figures

Figure 1.1 Triangulation de Delaunay contrainte.....	4
Figure 1.2 Exemples de triangulations de Delaunay filtrées.....	5
Figure 1.3 Exemple de grilles régulières.	6
Figure 1.4 Exemple de carte de cheminement.	7
Figure 1.5 Carte de champs de potentiels.....	8
Figure 1.6 Problèmes de repérage dans une zone particulière de Boston	133
Figure 2.1 Différents types de configuration	15
Figure 2.2. la carte convexe	16
Figure 2.3. La carte axiale	17
Figure 2.4. La perméabilité.....	18
Figure 2.5. La profondeur.	18
Figure 2.6. montre les représentations graphiques des configurations (A) et (B).....	19
Figure 2.7. Les isovists I1 et I2 se chevauchent en s.....	23
Figure 3.1. Trois modèles de représentation mentale des connaissances sur l'environnement selon Tversky	36
Figure 3.2. Représentation mentale hiérarchique pour la navigation	39
Figure 3.3. Algorithme de navigation de Mallot.....	39
Figure 4.1. Les composants du modèle	533
Figure 4.2. Exemple d'un environnement urbain.....	544
Figure 4.3. Intégration de la syntaxe spatiale dans un SIG.....	55
Figure 4.4. Ajouter l'intégration locale et la connectivité aux routes.....	56
Figure 4.5. Vue globale sur la création de l'environnement à partir du shapefile.....	57
Figure 4.6. L'architecture d'agent.....	58
Figure 4.7. Intersection de deux routes(A).	59
Figure 4.8. Intersection de deux routes(B).	59
Figure 4.9. Intersection de trois routes.	59
Figure 4.10. Les valeurs de l'intégration locale pour « Toy city » utilisée dans le modèle.	61
Figure 4.11. Les valeurs de la connectivité pour « Toy city » utilisée dans le modèle.....	61
Figure 4.12. Un exemple des points de décisions dans un environnement urbain et la route du piéton selon l'intégration locale et la connectivité.....	62
Figure 4.13. Le modèle de wayfinding	63
Figure 4.14. Représentation du réseau des routes	64
Figure 4.15. Le modèle détaillé de wayfinding.....	65

Figure 4.16. L'agent wayfinder.....	666
Figure 4.17. La route par l'intégration locale.	666
Figure 4.18. La route par la connectivité.	67
Figure 5.1. La couche des routes qui constituent l'environnement virtuel conçu sous Repast Symphony.	70
Figure 5.2. La couche des intersections qui constitue l'environnement virtuel conçu sous repast simphony	71
Figure 5.3. La couche des stations qui constitue l'environnement virtuel conçu sous Repast Symphony.	71
Figure 5.4. La couche des agents qui constitue l'environnement virtuel conçu sous Repast simphony.....	72
Figure 5.5. Les étapes de la simulation	73
Figure 5.6. Organigramme représente le processus de wayfinding.	74
Figure 5.7. La position de chaque agent au début à de la simulation $T=0$	75
Figure 5.8. La densité des routes dépend de leurs valeurs de l'intégration locale $T=1$	75
Figure 5.9. La plus part des agents atteignent leurs destination $T=2$	76
Figure 5.10. Des mesures concernant l'intégration locale.....	76
Figure 5.11. Des mesures concernant la connectivité.	77

Introduction générale

L'évaluation des bâtiments et l'augmentation de la complexité des milieux urbains rendent la tâche de la navigation des piétons plus délicate et plus particulièrement les piétons qui ne sont pas familiarisés avec cet environnement. Les chercheurs dans plusieurs domaines (l'urbanisme, la cognition spatiale, l'informatique, etc...) ont étudié ce problème sous différents angles et de son point de vue [KUI78] [ALI99] [LYN60] [BEA12].

L'apparition de la théorie de la syntaxe spatiale, qui est développée à l'université « College of London » au milieu des années 1980s, permet aux chercheurs d'étudier les configurations spatiales et leurs influences sur les activités humaines. Ce qui sert comme support de base pour développer des modèles et des simulations comme outil prédictif et analytique de la circulation des piétons en environnement urbain.

Autrement dit, c'est le problème de wayfinding en milieu urbain qui consiste à chercher et à savoir quels sont les principaux éléments de l'environnement qui influent sur ce processus.

C'est dans ce contexte que s'intègre notre travail qui consiste à traiter le problème de wayfinding où les piétons sont dans un environnement non familier et ils cherchent une destination précise. Plus précisément, il s'agit de la modélisation du processus de wayfinding en environnement urbain par des piétons qui ne sont pas encore familiarisés avec cet environnement. Pour cette raison nous avons utilisé la technique de la syntaxe spatiale comme outil mathématique pour la description et l'abstraction de l'environnement.

La motivation d'utilisation de la syntaxe spatiale est d'étudier l'effet des configurations spatiales sur le comportement des piétons notamment sur leurs décisions ; mais aussi de prédire les lieux de mouvement de ces derniers. À ce propos, notre intérêt s'est focalisé sur la comparaison de deux paramètres de la syntaxe spatiale utilisés dans le processus de wayfinding qui sont l'intégration locale et la connectivité des différents points de l'espace.

Notons que notre première contribution consiste à construire un environnement virtuel sous Repast Symphony à l'aide des données d'une ville réelle « Toy City » [NIC08]. Ces données sont des shapefiles construits par un SIG qui sont importées sur Repast Symphony.

La deuxième contribution consiste en une décomposition de l'environnement sous cette plateforme en routes et points d'intersections qui représentent les points de prise de décision pour les piétons. La troisième et dernière contribution consiste à quantifier la syntaxe spatiale moyennant l'outil « OpenJUMP » pour les calculs de l'intégration locale et la connectivité de chaque route. Les résultats obtenus ont été intégrés dans les shapefiles.

De ce qui précède, nous remarquons que l'idée proposée dans notre travail consiste en une utilisation des paramètres de la syntaxe spatiale comme des indicateurs de choix des chemins qui seront utilisés par des piétons. À ce propos, dans notre proposition le piéton sera influencé par sa destination, le paramètre de la syntaxe spatiale à utiliser ainsi que sa valeur.

Nous avons choisi à utiliser les destinations comme des éléments essentiels dans la modélisation du processus de wayfinding pour que le piéton s'oriente vers les coordonnées de sa destination.

Par ailleurs, nous rappelons que dans notre modèle le processus de wayfinding est dans un environnement non familier, ce qui va compliquer la tâche des piétons puisque le chemin choisi peut ne pas être le bon chemin. Dans ce cas, le piéton doit retourner à la dernière intersection et choisir la valeur maximale avec l'exclusion de la précédente et ainsi de suite.

Dans le présent manuscrit, le modèle préconisé ainsi que ses apports pour la prévision et la prédiction des cheminements des piétons est présenté dans la deuxième partie du mémoire (chapitre quatre intitulé wayfinding à base de la syntaxe spatiale et le chapitre cinq relatif à l'implémentation du modèle et aux résultats obtenus). Conséquemment, cette partie de ce mémoire de magister est, logiquement, précédée par une partie « théorique » relative à une revue bibliographique relative à l'environnement urbain en particulier (chapitre 1) et aux rappels sur la syntaxe spatiale (chapitre 2) et sur le processus de wayfinding (chapitre 3).

Ces deux grandes parties du manuscrit sont cadrées par une introduction et conclusion générales.

Chapitre 1 : Présentation de L'environnement

1. Présentation de L'environnement

1.1. Introduction

Étant donné que notre travail est réalisé dans un environnement urbain virtuel, ce premier chapitre est réservé, logiquement, en une présentation de cet environnement. Plus précisément, la première partie de ce chapitre donne une vue générale sur l'utilisation de chaque représentation et aussi représente les avantages et les inconvénients de chaque méthode. La deuxième partie de ce chapitre met la lumière sur l'environnement urbain et plus particulièrement sur les travaux de Lynch cités dans son livre « l'image de la cité » où il propose un modèle d'interprétation des différentes composantes du paysage urbain [LYN60].

1.2. L'environnement virtuel

1.2.1. Représentations exactes de l'environnement

Le but de la représentation exacte de l'environnement est d'organiser les données spatiales avec une conservation totale des informations. Le principe général de cette représentation est de découper l'espace navigable en cellules convexes de différentes formes. Cette subdivision est faite selon plusieurs modèles dont le plus connu est « la triangulation de **Delaunay** » et ses évolutions que nous présentons ci-après.

1.2.1.1. Triangulation de Delaunay

La triangulation de Delaunay 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 [PAR07].

Les avantages de cette triangulation sont multiples :

- chaque point y est relié à son plus proche voisin par l'arête d'un triangle,
- une représentation de l'espace navigable où les points d'entrée étant issus des obstacles,

- le calcul du graphe de voisinage entre les entités mobiles «point d'entrée» lors de la simulation.

1.2.1.2. Triangulation de Delaunay contrainte

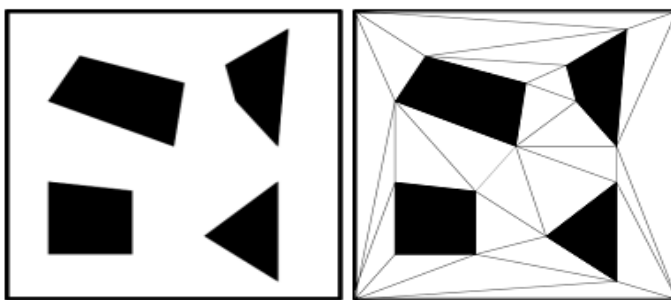
Cette triangulation permet de réduire les contraintes de la version standard pour garder certaines arêtes de la définition graphique d'origine (figure 1.1).

La triangulation de Delaunay contrainte étend la notion de la plus proche voisin en permettant d'y associer une notion de visibilité.

Si l'on considère que les arêtes contraintes coupent la visibilité d'un point à l'autre, la propriété de plus proche voisin devient : chaque point est relié à son plus proche voisin visible.

La triangulation de Delaunay est utilisée pour obtenir une subdivision spatiale en triangles et pour introduire les obstacles à la navigation sous forme de segments contraints.

Le nombre de triangles produit lors de cette subdivision est linéaire en fonction de nombre de points ; ce qui montre que la discrétisation est donc directement proportionnelle à la complexité géométrique de l'environnement. Cette caractéristique marque un avantage par rapport aux méthodes approximatives où la discrétisation est en fonction de la précision de la représentation [PAR07].



(a) Environnement d'origine

(b) Triangulation de Delaunay contrainte

Figure.1.1- Triangulation de Delaunay contrainte [PAR07].

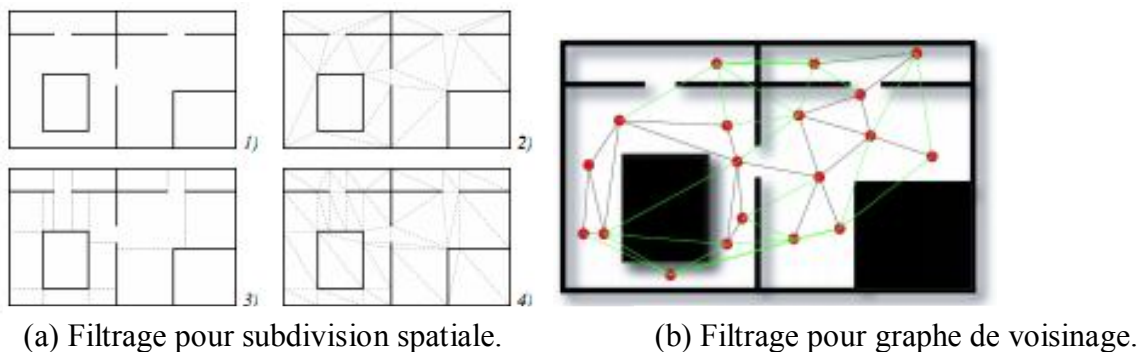
1.2.1.3. Triangulation de Delaunay filtrée

La triangulation de Delaunay filtrée est une extension de la version contrainte où deux types de filtrages sont proposés :

- un filtrage pour augmenter le nombre de triangles produits afin d'affiner la représentation de l'environnement,
- un filtrage pour diminuer le nombre de triangles produits afin de tenir compte de la visibilité pour l'élaboration d'un graphe de voisinage.

Deux applications de la triangulation de Delaunay filtrée sont d'usage courant :

- *La triangulation de Delaunay filtrée à la subdivision spatiale* : le processus d'ajout progressif des contraintes qui représentent les goulets d'étranglement à la triangulation de Delaunay nous permettra d'obtenir une triangulation de Delaunay filtrée et avec la considération de toutes les arêtes produites, tous les rétrécissements paraît dans l'environnement seront présentés.
- *La triangulation de Delaunay filtrée aux graphes de voisinage* : l'application est similaire à la précédente où on supprime des arêtes intersectés des obstacles de l'environnement. Cette triangulation nous aide à définir les voisins directs visibles d'une entité [PAR07].



1) Environnement d'origine. 2) Triangulation de Delaunay contrainte. 3) Calcul des plus courtes distances des sommets aux segments voisins. 4) Triangulation filtrée.

Seules les arêtes noires seront conservées, n'entrant pas en collision avec les obstacles de l'environnement.

Figure.1.2 -Exemples de triangulations de Delaunay filtrés[PAR07].

1.2.2. Représentations approximatives de l'environnement

Généralement les représentations approximatives de l'environnement sont les plus utilisées en animation comportementale parce qu'elles sont facile de mise en œuvre. Ces représentations décrivent l'espace libre de navigation avec des formes géométriques simples telles que des carrés ou des segments.

Deux modèles entrent dans cette catégorie : les modèles à base de grilles, et les cartes de cheminement.

Ces deux modèles sont détaillés ci-après.

1.2.2.1. Modèles à base de grilles

Le premier modèle de représentation approximative utilise des grilles régulières, formées de cellules carrées en deux dimensions et cubiques en trois dimensions.

La précision de la représentation obtenue dépend directement de la taille des cellules utilisées : plus les cellules sont grandes, moins la représentation est précise.

Pour rappel, l'inconvénient de cette méthode réside dans l'augmentation proportionnelle de l'occupation mémoire due à l'augmentation de la précision. Ce qui influence sur la complexité de recherche de chemin à l'intérieur de l'environnement.

Pour réduire ce problème, une évolution de ce modèle est apparue sous la forme des grilles hiérarchiques (figure 1.3). Cette méthode décrit l'espace navigable par une succession de grilles de plus en plus précises, organisées sous forme d'arbre [PAR07].

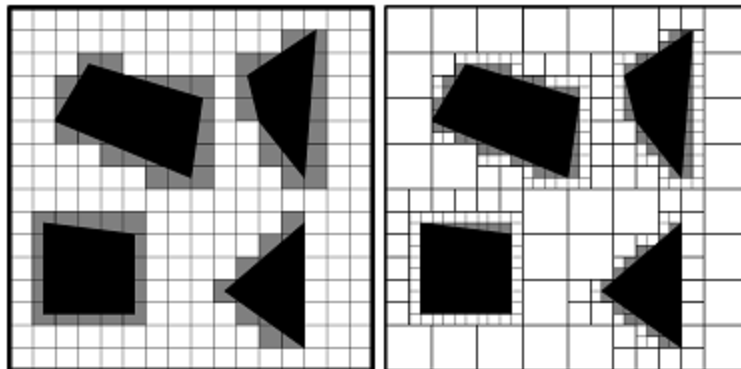
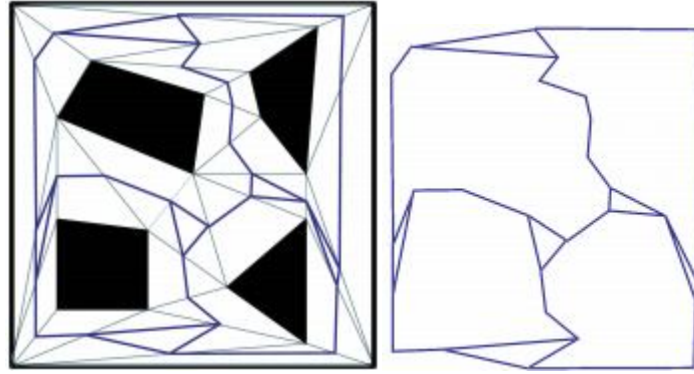


Figure.1.3- Exemple de grilles régulières [PAR07].

Les méthodes à base de grilles sont très utilisées en animation comportementale à cause de leur simplicité de mise en œuvre et de leur rapidité d'exploitation.

1.2.2.2. Les cartes de cheminement

Les cartes de cheminement discrétisent l'espace navigable sous la forme d'un réseau de chemins [PAR07]. Ce réseau est obtenu en reliant des points clefs répartis à l'intérieur de l'environnement. Plusieurs méthodes existent pour créer des cartes de cheminement, différentes dans la manière de créer et de relier ces points clefs (figure 1.4).



(a) Calculs sur l'environnement d'origine (b) Exemple de carte de cheminement

Figure.1.4- Exemple de carte de cheminement [PAR07].

1.2.2.3. Graphe de visibilité

Cette méthode utilise les sommets des polygones représentant les obstacles comme points clefs. Ces points clefs sont ensuite reliés deux à deux s'ils sont mutuellement visibles.

Les graphes créés minimisent les distances parcourues et assurent l'obtention des chemins de longueur minimale. Cependant, la taille du graphe généré est ici dépendante du nombre de points mutuellement visibles.

1.2.2.4. Diagramme de Voronoï généralisé

Cette méthode est basée sur une notion d'équidistance aux obstacles de l'environnement.

Son principe est le suivant : un ensemble de sites sont évalués au sein de l'environnement correspondant aux obstacles dont les intersections vont former les points clefs. Les chemins générés maximisent la distance aux obstacles.

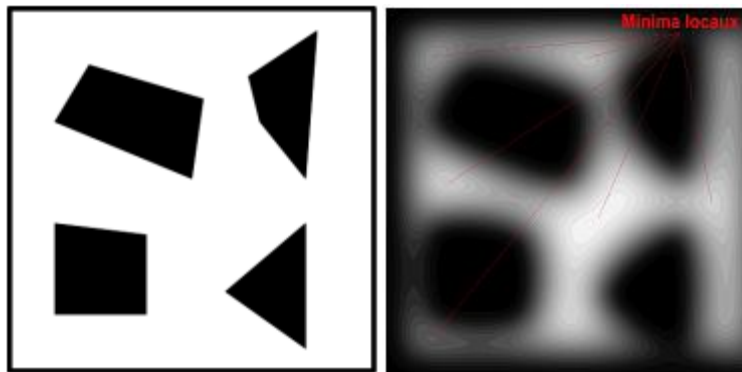
1.2.2.5. Cartes de cheminement probabilistes

Avec cette méthode, la définition géométrique de l'environnement n'est pas utilisée comme support direct de la construction. Les points clefs sont ici obtenus par une distribution aléatoire au sein de l'environnement navigable. Deux points sont ensuite reliés s'il existe un chemin libre de collision entre eux. Ce test est effectué en se basant sur la géométrie de l'environnement, mais aussi sur la taille de l'entité qui se déplace.

Cette méthode, qu'est plus largement utilisée en planification de mouvement et la navigation, présente un avantage qu'est celui 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 [PAR07].

1.2.2.6. Le modèle de champs de potentiels

Le modèle à base de champs de potentiels consiste en une définition de l'environnement permettant directement de résoudre les déplacements de personnes. Les champs de potentiels caractérisent les obstacles de l'environnement par des forces de répulsion et les buts par des forces d'attraction. 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. La navigation d'une entité est alors simulée par une descente de gradient depuis sa position dans l'environnement (figure 1.5).



(a) Environnement d'origine

(b) Exemple de champs de potentiels

Figure.1.5- Carte de champs de potentiels [PAR07].

Dans la figure 1.5(b), les obstacles (répulsion) sont décrits en noir et en blanc les zones de navigation (attraction). Le gradient de gris exprime la valeur de potentiel dans l'environnement. Cet exemple contient 6 minima locaux : zones isolées à potentiel d'attraction maximal.

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. 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 (RandomPathPlanner) [PAR07], 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. D'autres méthodes existent à base de tirage aléatoire de direction à suivre, plutôt que de configuration, pour échapper au minimum local. Ces méthodes ne sont cependant pas très adaptées à l'animation comportementale. Les comportements induits par les tirages aléatoires, s'ils sont acceptables pour des robots, ne le sont pas pour des humanoïdes car ils sont en dehors de la logique de navigation humaine qui comporte une part importante de planification.

D'une manière générale, les méthodes à base de champs de potentiels ne sont pas applicables directement à la simulation humaine du fait du manque de souplesse dans la méthode de contrôle. On peut néanmoins trouver quelques cas d'application à grande échelle où le comportement individuel est noyé dans la caractérisation globale des mouvements de milliers d'individus. 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.

1.3. L'Environnement urbain

Au cours des années 1960 et 1970, en réaction à l'impact destructeur du Modernisme sur les villes américaines et sur la vie urbaine, Kevin Lynch [Lyn60] Christopher Alexander et Jane Jacobs ont travaillé sur la lisibilité de la ville. Ils entendaient par

« rendre une ville plus « lisible » » le fait de redouter les villes de fonctions symboliques et sociales par le truchement de l'étude et d'une manière nouvelle de concevoir les éléments urbains (rues, espaces publics, etc...). Ils ont eu des critiques virulents de « la perte de dimension humaine des villes modernes ». Ce point de vue a conduit tout particulièrement Lynch à baser ses travaux sur des méthodes empiriques impliquant les divers points de vue des habitants des différentes villes qu'il a étudié. Sa méthode globale est basée essentiellement sur des entrevues et questionnaires qu'il soumet aux différentes catégories de citoyens qu'il analyse pour élaborer une théorie empirique sur la lisibilité d'une ville.

Par différentes catégories de citoyens, nous entendons, des citoyens dont l'expérience de la ville est différente variant d'une quasi-ignorance de l'environnement à une connaissance extrêmement poussée.

Dans la suite de ce chapitre, nous insistons sur l'aspect empirique des travaux de Lynch. En effet, il n'avait pour but, à la publication de son livre « l'image de la cité » [LYN60] que de proposer un modèle d'interprétation des différentes composantes du paysage urbain [ROM05]. Pour Lynch : *« Chaque citoyen a eu l'occasion de pratiquer des parts spécifiques de sa cité pendant un temps conséquent. En conséquence de quoi, l'image qu'il se fait de ces parties est baignée de sens et de souvenirs »*.

Dans cette section, nous allons nous intéresser essentiellement à la contribution majeure des travaux de Lynch dans son livre « l'image de la cité ». En effet, sa contribution consiste à créer cinq types d'entités urbaines : les nœuds, les voies, les quartiers, les limites et les points de repères.

Ce sont des composantes avec lesquelles il lui est possible de décrire l'image mentale qu'un citoyen a de sa ville. Ces composantes sont détaillées ci-après.

1.3.1. Les voies

Ce sont des itinéraires familiers aux citoyens. Ce sont, également, des canaux de circulation au long desquels les citoyens se déplacent potentiellement, occasionnellement, ou régulièrement. Ce sont, enfin, les axes de circulation majeurs et mineurs que les citoyens emploient pour se déplacer au sein de leur cité.

Selon Lynch, une ville se doit d'avoir un réseau de voies majeures (principalement ce que l'on peut définir informellement par l'expression « grands axes ») et également plusieurs réseaux locaux (ou de voisinage selon Lynch) de voies plus personnelles à chaque citoyen[ROM05].

1.3.2. Les quartiers

Ce sont des aires urbaines dont on perçoit l'homogénéité interne. Il s'agit des zones urbaines ayant une identité propre qui se manifeste par le fait que l'on puisse retrouver des caractéristiques communes au sein des éléments urbains composant un quartier. Lynch associe à cette identité une mesure qu'il appelle le gradient thématique. Certains quartiers par exemple sont dédiés à des fonctions commerciales ou socioculturelles ou même présentent une identité architecturale forte.

Selon Lynch une ville est composée de quartiers ou de voisinages dont certains peuvent être distingués a priori comme le centre-ville, les banlieues, les zones industrielles, les campus universitaires, etc... [ROM05].

1.3.3. Les limites

Sont des lignes séparatrices entre quartiers. Des frontières visibles marquant une interruption nette dans le paysage urbain. D'après Lynch: « *Ce sont des frontières entre deux phases. Elles représentent une cassure linéaire dans la continuité. Ce peuvent être des rivages dans le cas d'un port, des voies ferrées, des murs, des grands axes de circulation, des zones urbaines en développement, etc...* ». La frontière d'un quartier est sa limite. Il faut noter cependant que certains quartiers ne possèdent pas de limites bien définies, mais s'estompent progressivement, leur gradient thématique diminuant régulièrement à mesure que l'on s'éloigne du quartier.

De même, certains quartiers finissent en se fondant ou en se mélangeant à un autre quartier, en une zone commune où les caractéristiques des deux quartiers sont observables avec une intensité plus faible que dans les cœurs respectifs de ces deux quartiers. Notons que lorsque deux quartiers partagent une limite claire et bien définie, ils forment ce que Lynch nomme une veine ou un filon. On peut également constater qu'il existe selon Lynch des limites dont l'existence n'est pas corrélée à un quartier. La caractéristique principale d'une limite est de représenter une rupture dans

la continuité du paysage urbain tout en étant elle-même identifiable visuellement et continue[ROM05].

1.3.4. Les points de repères

Selon Lynch « *des points de référence dans lesquels on ne peut pas entrer, ils n'ont pas de dimension interne, ils sont externes. Ils sont généralement définis comme des objets physiques simples, des bâtiments, des boutiques, des panneaux de signalisation, ou même des éléments géographiques comme des collines ou des montagnes ...* ». On ne peut pas découpler la définition de points de repère que donne Lynch de caractéristiques visuelles. En effet, les points de repère peuvent appartenir à deux catégories : visibles de loin en tant qu'objets saillants de haute altitude, comme la Tour Eiffel à Paris, ou plus locaux et de taille plus modeste, correspondant plus à une expérience personnelle de l'agent à un objet urbain (porte, arbre, bâtiment, etc...) dont la saillance dépend davantage de la culture et l'expérience que l'agent a de l'environnement. L'importance des points de repères réside dans le fait qu'ils aident le citoyen à s'orienter dans la ville et à identifier les aires urbaines dont ils font partie[ROM05].

1.3.5. Les nœuds

Peuvent être considérés comme des centres d'attraction dans lesquels le citoyen peut pénétrer. « *Les nœuds sont des points stratégiques de la ville dans lesquels l'observateur peut entrer, et qui sont également des foci ou zone de concentration vers lesquels ou depuis lesquels il voyage. Ils peuvent être des intersections urbaines importantes, des endroits où la physionomie de la circulation change, un carrefour, un point de convergence de voies, des endroits où la structure thématique et urbaine peut changer* ». Ou encore tout simplement une zone dont le pouvoir de concentration et de rassemblement est dû à un certains critères thématiques, socioculturels et historiques. Pour résumer un nœud est un centre focal de passage et d'activité urbaine.

On pourrait assimiler un nœud à un point de repère de part leurs propriétés saillantes et remarquables et leur fonction dans l'aide à la navigation. À ceci près, que ce dernier est un objet visuel distinct non-contenant, tandis que le nœud est un objet contenant, foyer d'activité citadine.

La figure ci-dessus représente les problèmes de lisibilités rencontrés à l'étude du centre-ville de Boston. La lisibilité est affectée lorsque l'on peut confondre un espace avec un autre, lorsque un espace est trop isolé pour être corrélé aux espaces environnants, ou encore lorsque il est dur de différencier la représentation mentale qu'un citadin a de plusieurs espaces [ROM05].

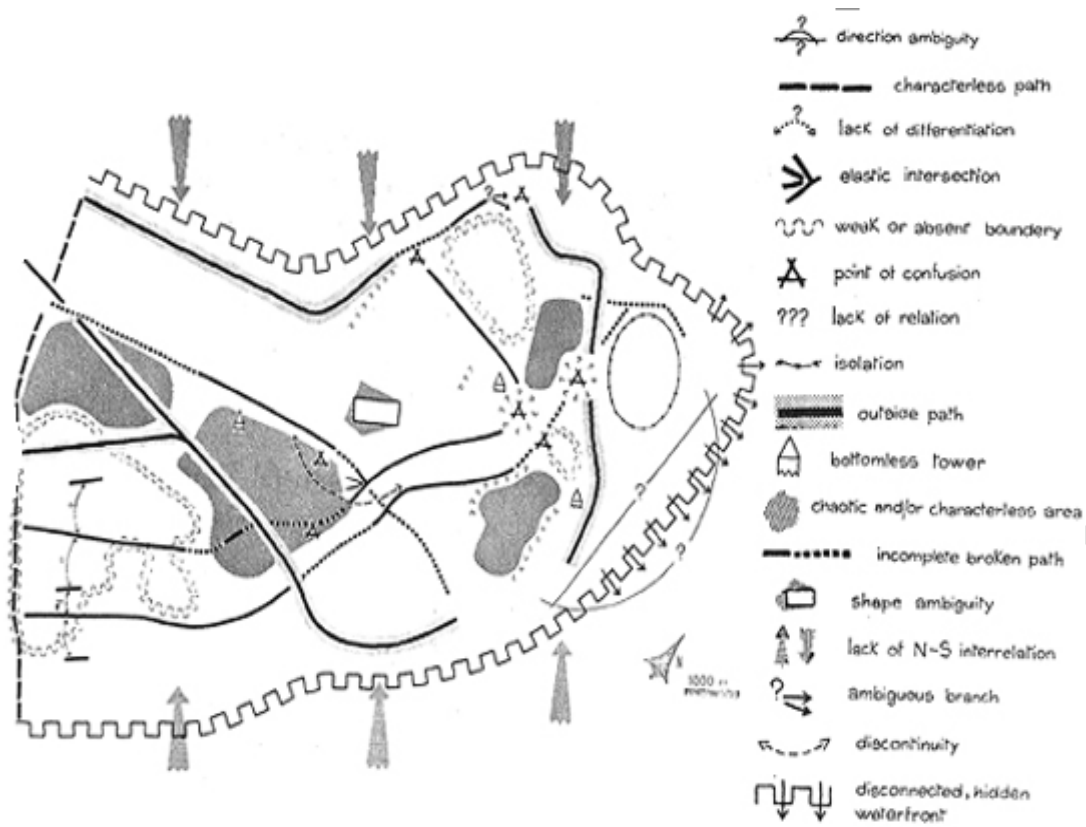


Figure.1.6 Problèmes de repérage dans une zone particulière de Boston [ROM05].

1.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons survolé les différentes méthodes utilisées pour représenter l'environnement virtuel. Aussi, nous nous sommes focalisés sur les travaux de Lynch ayant des bases empiriques. Car, ces travaux sont considérés comme des bases pour d'autres travaux pour une modélisation plus formelle des concepts développés par Lynch. Sur la base de ces rappels, nous allons nous intéresser, dans le chapitre suivant, à la syntaxe spatiale qui englobe un grand nombre de ces travaux formels.

Chapitre 2 :La théorie de la syntaxe spatiale

2. La théorie de la syntaxe spatiale

2.1. Introduction

La syntaxe spatiale est connue comme la théorie de l'espace et l'ensemble d'outils d'analyse, quantification et description pour l'analyse des configurations spatiales sous différentes formes : des bâtiments, des villes, des espaces intérieurs ou des paysages.

L'intérêt principal de la syntaxe spatiale est l'étude de la relation entre les êtres humains et leurs espaces habités et comment ces espaces influent sur leurs mouvements.

Il est également devenu un langage informatique pour décrire la structure spatiale de l'espace urbain. Cet espace urbain peut être divisé en deux catégories selon le mouvement de l'être humain :

- l'espace bloqué constitué des obstacles géographiques tels que les bâtiments et où les gens ne pouvaient pas se déplacer librement,
- l'espace libre qu'est la partie de l'espace urbain où les gens pouvaient se déplacer librement. C'est cet espace qui est concerné par l'étude de la syntaxe spatiale qui se concentre sur la relation topologique d'espaces, y compris l'inter-connectivité et l'accessibilité et non les distances physiques.

2.2. Les concepts de base dans la syntaxe spatiale

2.2.1. La configuration

La syntaxe spatiale définit la configuration comme étant la relation minimale entre deux espaces en prenant en compte un troisième (un tiers), ou comme les relations maximales entre plusieurs espaces dans un système qui prend en compte d'autres espaces. La configuration spatiale est ainsi une idée plus complexe qu'une relation spatiale qui n'invoque qu'une paire d'espaces ayant des rapports (figure 2.1).

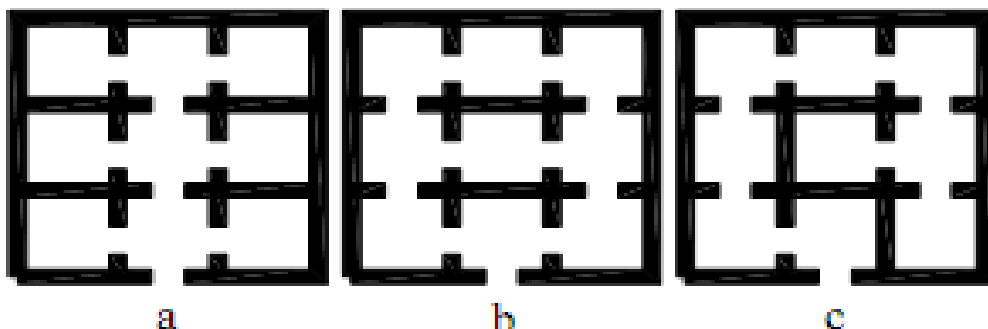


Figure.2. 1. Différents types de configuration [DAA12]

C'est à travers la configuration spatiale que les relations sociales et les processus sociaux s'expriment d'eux-mêmes dans un espace.

2.2.2. Espace convexe

L'espace convexe est une surface convexe où on ne trouve aucune ligne entre deux de ses points traverse le périmètre. Un espace concave doit être divisé en plus petit nombre possible d'espaces convexes.

2.2.3. Espace axial ou ligne axiale

L'espace axial est une ligne droite "ligne de vue" qui permet de suivre à pied (le chemin) [KLA93]. Les lignes axiales prennent naissance et se terminent dans trois configurations [ROM05] :

- À la rencontre d'un des « bords » de l'environnement.
- À la rencontre d'une frontière géographique infranchissable.
- À l'embranchement d'autres lignes axiales.

2.2.4. Espace isovist (Isovist)

L'espace isovist est l'espace total qui peut être aperçue par un humain à partir d'un point donné [KLA93]. La structure spatiale d'une implantation (layout) peut être représentée en utilisant trois types de cartes : cartes convexe, axiale et isovist.

Ces cartes sont détaillées ci-dessous.

2.2.5. Carte convexe

La carte convexe représente le plus petit nombre d'espaces convexes qui couvrent entièrement l'implantation (layout) et les liens entre eux (figure 2.2).

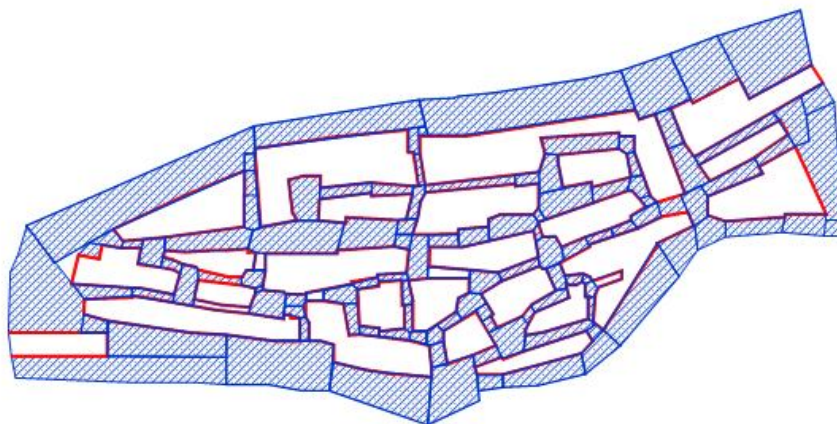


Figure.2.2 La carte convexe [DAA12]

La carte d'interface est un type spécial de carte convexe montrant les relations perméables entre les espaces extérieurs convexes et entrées des bâtiments adjacents.

2.2.6. Carte axiale

La carte axiale représente le plus petit nombre de lignes axiales couvrant tous les espaces convexes de l'implantation (layout) et leurs connexions [KLA93] (figure 2.3).

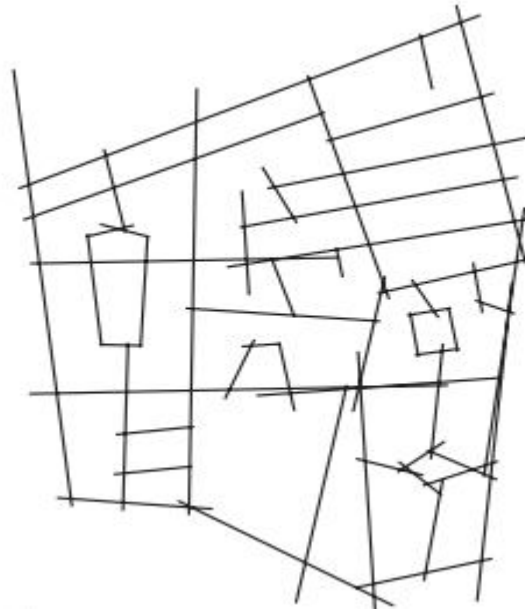


Figure.2. 3 -La carte axiale[DAA12]

2.2.7. Carte Isovist

Ce type de carte montre tous les isovists dont les points de générations se situent dans l'ensemble des espaces convexes et des lignes axiales. Conséquemment, le nombre d'isovists peut être infini et la discrétisation de l'ensemble des points de génération d'une implantation est nécessaire.

Les trois types de cartes peuvent être transformés en graphes pour le but d'analyse.

2.2.8. Graphe

Un graphe représente les relations de perméabilité entre tous les espaces convexes ou des espaces axiaux d'un plan. Les espaces sont représentés par des cercles ou des points (appelés nœuds) et les liens avec les lignes (arcs). Il est possible d'utiliser également des liens afin de représenter les relations de visibilité entre les espaces.

2.2.9. Laperméabilité

Dans la syntaxe spatiale, la perméabilité est une propriété subordonnée à la relation directe entre deux espaces.

La figure ci-dessous représente une cellule répartie en deux espaces. L'espace (a) est lié à l'espace (b) par une ouverture. Cette ouverture crée la relation appelée « perméabilité » entre les deux espaces.

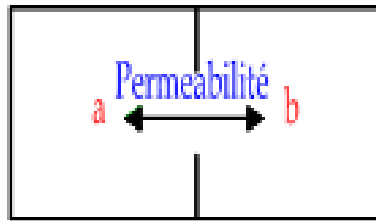


Figure.2.4 -La perméabilité [DAA12]

2.2.10. Pas syntaxique

Ce pas représente la relation de la connexité directe ou la relation perméable entre un espace et ses voisins immédiats. Dans la carte axiale, un pas syntaxique peut être compris comme le changement de direction d'une ligne à un autre.

2.2.11. Profondeur

La profondeur entre deux espaces est définie comme le plus petit nombre de pas syntaxiques dans un graphe qui sont nécessaires pour atteindre l'un à partir d'un autre [ROM05].

La profondeur est également la propriété de la syntaxe spatiale qui détermine le nombre d'étapes (d'espaces) à franchir pour aller d'un espace à un autre (figure 2.5).

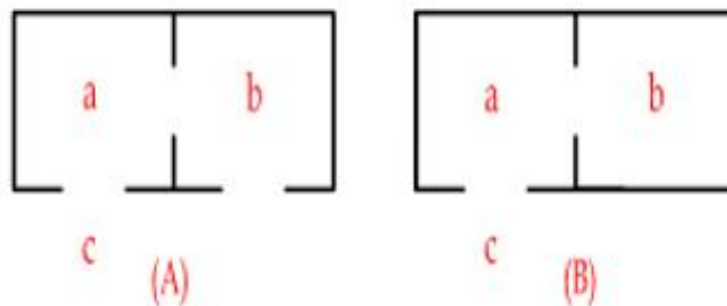


Figure.2.5 -La profondeur. [DAA12]

Dans la figure ci-dessus, les figures (A) et (B) montrent l'existence de deux relations possibles des espaces (a) et (b) avec l'extérieur ou l'espace (c).

En effet, dans la figure (A), les deux espaces sont directement liés à (c) mais dans la figure (B), seulement l'espace (a) est lié à l'extérieur. Donc, il est nécessaire de passer par l'espace (a) pour arriver à l'espace (b) venant de l'espace (c). Ceci signifie que la relation entre (a) et (b) change quand (c) est pris en considération.

Les représentations graphiques de la figure 2.6 clarifient la différence entre les configurations spatiales précédentes. C'est un graphe dans lequel un espace particulier est choisi comme «racine», les autres espaces dans ce graphe, sont alors alignés au-dessus de cette racine à des niveaux montrant le nombre d'espaces par lesquels on doit passer pour arriver à chaque espace à partir de la racine.

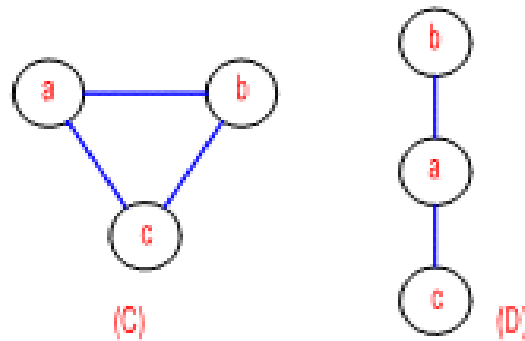


Figure.2.6 -Représentation graphiques des configurations (A) et (B). [DAA12]

Ainsi, les figures (C) et (D) sont, respectivement, les graphes justifiés de (A) et (B).

Il ressort de ces exemples qu'un espace est en profondeur :

- (1) à partir d'autres si l'on y accède directement,
- (2) s'il est nécessaire de passer par un espace pour y accéder,
- (3) si l'on doit passer à travers deux espaces pour y accéder et ainsi de suite.

La profondeur totale et la profondeur moyenne sont calculées selon les relations (1) et (2) suivantes :

$$td_i = \sum_{j=1}^n d_{ij} \quad (1)$$

Où : td_i est la profondeur totale pour l'unité i ,
 d_{ij} est la distance entre i et j ,
 n est le nombre totale des unités du système.

$$md_i = \frac{td_i}{n-1} \quad (2)$$

Où : md_i est la profondeur moyenne pour l'unité i ,
 td_i est la profondeur totale de i ,
 n est le nombre total des unités dans le système.

2.2.12. Graphe justifié

Un graphe justifié est un graphe restructuré de sorte qu'un espace spécifique est placé au fond «espace racine». Tous les espaces qui ont une distance d'un un pas syntaxique de l'espace racine

sont du premier niveau. De même, tous les espaces qui ont une distance de deux pas syntaxiques sont du deuxième niveau,... etc.

Le graphe justifié donne une image visuelle de la profondeur totale d'une implantation vu de l'un de ses points [DAA12].

2.3. Les paramètres de la syntaxe spatiale

Principalement, il existe deux types de mesures dans la syntaxe spatiale : les mesures locales (telles que la connectivité, la valeur de contrôle et l'intégration locale) et les mesures globales (telles que l'intégration globale).

Ces deux types de mesures apportent une perspective importante au système urbain perçu comme un espace à grande échelle tant du point de vue local et globale.

La syntaxe spatiale utilise quatre mesures syntaxiques qui peuvent être calculés pour une implantation. Ces mesures sont locales quand la relation est entre un espace et un autre, et sont globales quand la relation entre un espace et tous les autres.

Ces mesures sont utilisées dans les représentations quantitatives des bâtiments et les implantations urbaines.

2.3.1. Connectivité

La connectivité est une mesure statique locale qui calcule le nombre de voisins immédiats qui sont directement connectés à un espace donné. Il s'agit d'une mesure statique locale. Elle est calculée par la relation suivante :

$$C_i = k \quad (3)$$

Où : c_i est la valeur de connectivité pour l'unité i ,
 k est le nombre des unités connectés à i .

2.3.2. L'intégration globale

L'intégration globale (cf. équation 4) est une mesure statique globale. Elle décrit la profondeur moyenne d'un espace par rapport à tous les autres espaces dans le système. Les espaces du système peuvent être intégrés ou isolés (état de ségrégation).

$$g_i = \left[\frac{\frac{2(md_i - 1)}{n - 2}}{\frac{2(n \log_2 \left(\left(n + \frac{2}{3} - 1 \right) + 1 \right))}{(n - 1)(n - 2)}} \right]^{-1} \quad (4)$$

Où : g_i est l'intégration globale pour i ,
 md_i est la profondeur moyenne,
 n est le nombre total des unités dans le système

2.3.3. Valeur de contrôle

La valeur du contrôle (cf. équation 5) est une mesure dynamique locale. Elle mesure comment un espace contrôle l'accès à ses voisins immédiats en tenant compte du nombre de connexions alternatives que chacun de ces voisins possède.

$$ctr_i = \sum_{j=1}^m \frac{1}{c_j} \quad (5)$$

Où : ctr_i est la valeur de contrôle pour l'unité i ,
 m est le nombre de voisins immédiats de l'unité i ,
 c_j est la valeur de connectivité de l'unité j .

2.3.4. Choix global

Le choix global (cf. équation 6) est une mesure dynamique globale du «flux» à travers un espace. Un espace a une forte valeur de choix lorsqu'on a un nombre important de plus courts chemins de l'implantation qui traverse cet espace.

$$C_i^B = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{n_{jk(i)}}{n_{jk}} \quad (6)$$

Où : i, j et k sont des unités du système s ,
 n_{jk} représente le nombre du plus court chemin entre l'unité j et l'unité k

Remarque : Il est également possible d'élaborer à partir de ces mesures de premier ordre un autre ensemble de mesure du second ordre par la corrélation. L'intelligibilité, par exemple, est la corrélation entre la connectivité et de l'intégration et décrit la manière dont la profondeur moyenne d'un espace par rapport à une implantation peut être déduite de son nombre de ses connexions directes. [ROM05].

2.4. L'analyse dans la syntaxe spatiale

2.4.1. La carte axiale et l'intégration spatiale

À partir d'un ensemble de lignes axiales, il est possible de générer une représentation de l'environnement ou implantation que l'on nomme carte axiale. Cette carte axiale peut être soumise à une analyse configurationnelle, terme sous lequel on regroupe les différentes mesures

effectuées sur la carte axiale, La principale de ces mesure est le calcul du coefficient d'intégration spatial pour l'ensemble des lignes axiales d'une implantation [ROM05].

Le coefficient d'intégration d'une ligne axiale est défini par Penn comme : « la profondeur moyenne de cette ligne par rapport à toutes les autres avec un pas syntaxique maximum que l'on nomme rayon ».

En termes plus formels, pour calculer le coefficient d'intégration de chaque ligne d'une carte axiale, on transforme la carte en un graphe axial où chaque ligne axiale de l'implantation représente un sommet, et chaque arc représente une intersection entre deux lignes axiales. Une fois le graphe obtenu le coefficient d'intégration m_i d'une ligne axiale i de rayon r s'exprime très simplement de la manière suivante [ROM05] :

$$m_i = \sum_{j=1}^n d_{ij} \quad (7)$$

Avec : $\forall i, j \in [1, n], d_{ij} \leq r$.

n est le nombre de sommets du graphe

d_{ij} est le nombre d'arcs minimal pour joindre i et j .

2.4.2. L'Isovist

La définition la plus précise d'Isovist est celle donnée par Conroy : « *Un Isovist est la somme d'un nombre infini de lignes de vues (ou lignes axiales) passant par un point unique de l'espace (habituellement à hauteur d'homme) et occupant le même plan (habituellement parallèle au sol)* [ROM05].

L'isovists résoudre le problème d'existence d'une infinité d'isovists pour une surface donnée. Il existe alors deux solutions reposant sur des approximations pour le calcul de l'ensemble des isovists d'une implantation :

- le nombre de générateurs est prédéterminé et ces derniers sont placés à des points particuliers de l'implantation,
- on applique sur l'implantation une grille régulière de points générateurs le nombre de générateurs tant directement dépendant de la granularité de la grille.

Un graphe d'isovists (figure 2.7) est un graphe dans lequel les sommets représentent des points générateurs d'isovists. Les arcs sont construits à partir de l'une des deux règles suivantes [ROM05] :

T_1 : deux sommets sont reliés par un arc s'ils sont mutuellement visibles.

T₂ : deux sommets sont reliés par un arc s'il existe une intersection des isovists dont ils sont générateurs.

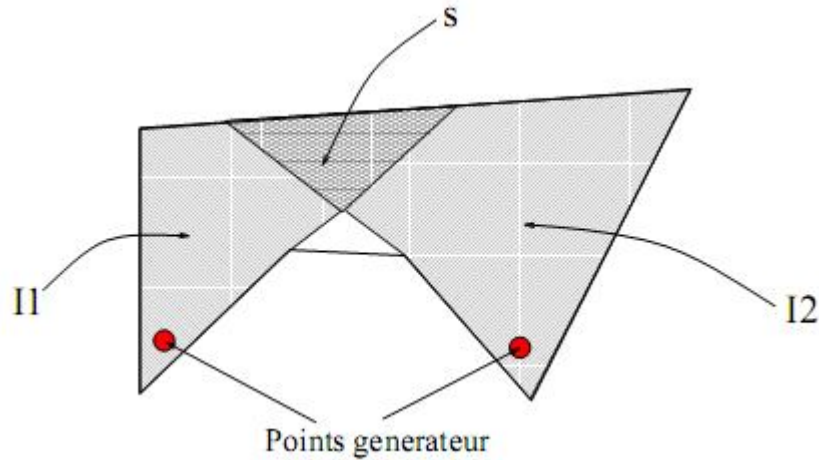


Figure.2.7 -Les isovists I1 et I2 se chevauchent en s [ROM05]

2.4.3. Un graphe de visibilité

Un graphe de visibilité est dans lequel on n'utilise que la première des règles énoncées ci-dessus : les sommets reliés d'un graphe de visibilité sont mutuellement visibles [ROM05].

2.4.4. Un graphe d'isovists

Un graphe d'isovists est un graphe dans lequel on n'utilise que la seconde des règles énoncées ci-dessus : les sommets reliés d'un graphe de visibilité sont des isovists dont certaines zones se chevauchent mutuellement [ROM05].

2.4.5. Le concept d'aires locales

Hiller et Penn [ROM05] définissent le concept d'aire urbaine locale comme une zone où la corrélation entre le mouvement piéton et l'intégration spatiale serait maximisée.

2.4.6. Analyse des graphes de visibilité et des graphes d'Isovist

La mesure employée pour l'analyse de graphe de visibilité est, comme pour les graphes axiaux, le coefficient d'intégration. Ce coefficient est exactement équivalent à la profondeur moyenne m_i d'un sommet i que définit par Turner :

$$m_i = \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij}}{n} \quad (8)$$

Avec : n est le nombre de sommets du graphe.

d_{ij} est le nombre d'arcs minimal pour joindre i et j .

En appliquant cette mesure à tous les sommets du graphe de visibilité, on obtient une intégration du graphe de visibilité, Cette mesure a la propriété étonnante d'être fortement corrélés au cheminement de piétons dans une implantation [ROM05].

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la théorie de la syntaxe spatiale où l'intérêt s'est porté, dans un premier temps, sur l'emploi dans l'analyse des configurations spatiale. Dans un second temps, nous avons rappelés les différents concepts de base de la syntaxe spatiale et les paramètres utilisés pour l'analyse spatiale et les différentes relations entre les êtres humains et leurs espaces habités et comment ces espaces influent sur leurs mouvements.

Dans le chapitre suivant nous présentons l'une des tâches importantes effectuées par des piétons qui est le processus de wayfinding.

Chapitre 3 : Le processus de wayfinding

3. Le processus de wayfinding

3.1. Introduction

Ce chapitre sera consacré à la recherche bibliographique sur wayfinding. Il sera centré sur les études qui ont traité l'environnement comme le facteur principal qui influe sur le processus de wayfinding.

Golledge en 1999 a noté que le wayfinding est le processus qui consiste à déterminer et de suivre un chemin ou une route entre une origine et une destination. Il s'agit d'une activité intentionnelle, dirigée et motivée. Il peut être observé comme une trace des actions sensori-motrices à travers un environnement. La trace est appelée un itinéraire qui est le résultat de la mise en œuvre d'un plan de déplacement. Ce plan encapsule la stratégie de choix de chemin. La lisibilité d'un itinéraire est la facilité avec laquelle il peut être connu, ou (dans le sens de l'environnement), la facilité avec laquelle les indices ou les caractéristiques pertinentes nécessaires pour guider les décisions de déplacement peuvent être organisés dans un schéma cohérent.

Le terme «wayfinding» est peut-être familier à la majorité des lecteurs, mais ce n'est pas un mot qui est accepté en anglais standard. Encyclopédie Britannique ne mentionne pas, ni le dictionnaire anglais Oxford. Néanmoins, il est bien connu, surtout par des gens qui ont eu la désagréable expérience de la navigation dans les environnements intérieurs et extérieurs moins familiers ou non familiers. Wayfinding est également un domaine de recherche important dans la cognition environnementale, l'environnement, le comportement et la géographie.

Selon Carpanet et Grant wayfinding, Wayfinding comporte cinq facteurs simples : savoir où vous êtes, connaissant votre destination, connaître et suivre le meilleur itinéraire jusqu'à votre destination, en reconnaissant votre destination à l'arrivée et de trouver votre chemin du retour. Wayfinding, ou plus généralement le mouvement humain, peut-être de nombreuses catégories et sa classification varie selon les critères choisis.

Du point de vue objectif, le mouvement humain peut être typiquement de trois sortes : les déplacements vers des destinations familières, les déplacements d'exploration et des déplacements vers des destinations nouvelles [ALI99].

Du point de vue des stratégies utilisées, wayfinding est également de trois types : le type le plus élémentaire où on suit simplement un chemin vers une destination, suivi d'une séquence de points de décisions sans nécessairement être capable de conceptualiser soit le total du voyage ou bien

l'environnement entier, et de maintenir des relations géométriques par une carte cognitive extrêmement détaillée [WEI79].

Ce chapitre vise à examiner attentivement les caractéristiques environnementales qui sont susceptibles d'avoir une certaine influence sur wayfinding humaine et la carte cognitive. Dans ce processus, la littérature de wayfinding est examinée pour savoir quelles sont les propriétés environnementales qui ont été considérées comme importantes par divers chercheurs.

Dans la section suivante, nous proposons différentes recherches sur wayfinding, surtout ceux qui ont examiné les différentes propriétés de l'environnement comme faisant parties essentielles du processus wayfinding.

3.2. La recherche en wayfinding

L'étude de wayfinding consiste à examiner comment l'humain navigue d'une origine à une destination. Wayfinding comporte deux éléments : l'environnement actuel et la façon dont il interagit avec les gens.

Puisque wayfinding implique la compréhension de l'environnement et l'interaction avec celui-ci, le comportement de wayfinding qui peut être documenté, devient un aspect important de la recherche. Les chercheurs ont traité ce comportement et ils l'ont utilisé pour une compréhension théorique de wayfinding. Le développement des stratégies et les techniques pour wayfinding et pour d'autres sujets de recherches tels que : la prise de décision spatiale, la planification de chemin, le choix de l'itinéraire...etc. [SEI01].

Wayfinding est très important dans plusieurs domaines de recherches. Citons à titre de rappel [LYN60] : la connaissance de l'environnement, l'urbanisme, transportation, l'intelligence artificielle, typographie, cartographie...etc.

La recherche en wayfinding peut être classée en deux catégories :

- D'une part, plusieurs chercheurs mettent en place le « modèle cognitif » de wayfinding ; aussi appelé le modèle médiateur ou un processus interne est dit médiateur entre l'environnement et le comportement de wayfinding. Ils disent que l'entrée sensorielle de l'environnement est complétée et enrichi par la connaissance qui est déjà possédée par le percepteur. C'est la position que cette étude prend.
- D'autre part, quelques chercheurs acceptent les théories de la perception écologique telle que proposée par Gibson [GIP79] et l'hypothèse que l'environnement agit directement sur le comportement de wayfinding, sans médiation cognitive.

3.2.1. Wayfinding comme une activité cognitive

Dans ces études de wayfinding, certains processus humains devraient des intermédiaires entre l'environnement et le comportement produit. Dans la plupart des cas, les cartes cognitives humaines jouent le rôle de médiateur. La plupart des chercheurs de wayfinding prennent cette position dans leur travail, mais le problème posé est comment ils conceptualisent la production du processus de wayfinding et quelles sont les qualités environnementales et les capacités humaines qu'il soit prendre en compte.

Dans cette catégorie, la littérature de wayfinding traite soit des modèles théoriques ou les résultats des recherches empiriques. Gluck [GLU91] les désigne comme la littérature de compétence et de performance respectivement. La littérature de compétence fait l'extension des modèles théoriques de wayfinding à des modèles informatiques. D'autre part, la littérature de performance contient des résultats empiriques sur la façon dont les gens à trouver leur chemin.

3.2.1.1. Les modèles théoriques/Littérature de compétence

La littérature de compétence comprend des propositions théoriques pour différents modèles de wayfinding. Bien que ces modèles traitent le comportement humain, certains chercheurs ont développé des modèles informatiques qui simulent le comportement de wayfinding humain et l'apprentissage spatial. Ces modèles touchent les capacités humaines et les caractéristiques environnementales.

3.2.1.1.1. Wayfinding pour résoudre des problèmes spatiaux

Un modèle important de wayfinding a été proposé par [PAS84]. Il est développé à travers trois expériences réalisées en cinq grands complexes urbains du centre-ville de Montréal. Dans l'expérience, il a analysé les protocoles de décision des participants qui ont été recueillis en leur demandant de parler dans un magnétophone qui enregistre leurs décisions spatiales et les raisons qui les motivent.

Selon ce modèle, Passini a déterminé wayfinding comme un processus cognitif comprenant trois capacités distinctes: une *cartographie cognitive* ou la *capacité de génération d'information* qui nous permet de comprendre le monde qui nous entoure; la *capacité de prise de décision* qui nous permet de planifier les actions et de les structurer dans un plan global et la capacité d'exécution de la décision qui transforme les décisions en actions comportementales. La prise de décision et l'exécution des décisions sont tous les deux basées sur les informations générées par la carte cognitive.

À partir de ce point de vue, les unités nécessaires de wayfinding sont des informations environnementales, les décisions et les comportements. Informations sur l'environnement

proviennent de trois sources : les informations sensorielles, des informations de la mémoire et toute combinaison des deux précédents types.

Passini dit que l'accès à l'information est influencée par les caractéristiques personnelles et culturelles. Ces informations sont descriptives, de localisation et temporelle.

Dans son modèle, Passini met l'accent sur les aspects humains axés sur le processus de prise de décision spatiale. Il propose que cela soit fait à partir des plans de décision hiérarchiques ou des plans de déplacement où les plus généraux sont au sommet et ceux conduisant à un comportement spatial sont en bas. L'exécution de ces plans de déplacement mène à un comportement.

3.2.1.1.2. Wayfinding comme formation et exécution du plan de déplacement

Comme Passini, le modèle de Garling, Gook et Lindberg [GAR84] [GAR86] est construit autour de l'idée de wayfinding est la formation et l'exécution des plans de déplacement. Un plan de déplacement est un élément de la carte cognitive, il spécifie comment aller d'un endroit à un autre. Selon Garling, il est conçu comme un ensemble d'instructions précisant comment déplacer, contient des informations sur l'environnement et l'acquisition continue de l'information.

Les informations sur l'environnement sont accessibles à travers l'observation directe, les médias et la carte cognitive elle-même. Au moment de mouvement, le plan de déplacement est mis à jour si une nouvelle information est acquise.

Ce modèle est plus étendu car il établit une distinction entre les différentes capacités de la Wayfinder. Par exemple, dans la formation et l'exécution des plans de déplacement, certaines personnes, en particulier les nouveaux arrivants, peuvent appuyer plus sur des supports comme des signes, les cartes et sur l'observation directe, tandis que d'autres peuvent être plus dépendants de leurs cartes cognitives acquises.

Plus important encore, l'environnement n'est pas ignoré dans ce modèle de wayfinding qui prend en compte l'aspect psychologique et le traitement d'information.

Garling a proposé également un système de classification des environnements en fonction de trois variables qui influent sur la facilité d'orientation spatiale et de wayfinding. Ces variables sont :

- Le *Degré de différenciation* qui est le degré auquel les différentes parties de l'environnement sont identiques ou différents. Évidemment, cela affectera sur la capacité de reconnaissance des lieux.

- Le *Degré d'accès visuel* dans un environnement qui se réfère à la mesure dans laquelle les différentes parties de l'environnement peuvent être vues à partir d'autres parties. Cela confirme la reconnaissance, la localisation et l'orientation.
- *La complexité de la configuration spatiale* qu'est liée à la taille de l'environnement et selon Garling le nombre de destinations et des routes, leurs caractéristiques d'intersection.

La différence entre le modèle de Garling et celui de Passini se résume dans les deux points suivants : les besoins environnementaux des nouveaux arrivants et des personnes avec différents degrés de connaissance de l'environnement, et la seconde, le modèle de Garling comprend des descriptions importantes des variables spatiales.

3.2.1.2. Littérature de performance/ les recherches empiriques

Avant de discuter des résultats empiriques importants trouvés dans la littérature de la performance, il est à noter que de nombreux chercheurs ont eu des difficultés d'intégration d'environnement dans leurs travaux. Peut-être pour deux raisons qui sont :

- La concentration sur la carte cognitive : la plupart des chercheurs ont étudié les qualités environnementales du point de vue de leur représentation des cartes cognitives.
- Le manque d'outils et de méthodologies qui pourraient être utilisées pour quantifier l'environnement du point de vue du comportement dans ce dernier.

Pour l'instant, le travail de Kevin Lynch [LYN60] a distingué les nœuds, les routes, les quartiers, les arêtes et les points de repères comme étant importants pour la lisibilité des villes. Il les a identifiés à partir de l'étude : des schémas des cartes, des transcriptions d'entretien et la description du trajet de ses participants aux expérimentaux dans trois villes américaines.

Bien que son travail est extrêmement influent et a été la base de nombreuses études, ses unités environnementales sont vagues. C'est le cas par exemple du concept de point de repère dont la signification se défait d'une personne à une autre. Par conséquent, la définition objective devient difficile aussi, les variables relationnelles ont été théorisées comme importantes, mais ne pouvaient pas être facilement intégrées dans les travaux empiriques. Ainsi, quelles que soient les qualités environnementales qui ont été prises comme facteurs prédictifs de wayfinding, les chercheurs ont toujours essayé de définir ou de quantifier rigoureusement ses propriétés.

Dans la plupart des cas, l'environnement a été construit à partir d'une définition utilisée de la cognition et le processus de wayfinding. Par exemple le modèle de [PAS84] a mis l'accent sur le traitement de l'information environnementale comme une composante importante de wayfinding et ainsi il a décrit les éléments de l'environnement de ce point de vue. Dans le modèle de

Garling[GAR86], trois variables ont également été développées selon les exigences pour certains processus cognitifs de base telles que la reconnaissance des lieux, la localisation des points de référence, le rappel, la sélection et la séquence des destinations. Il s'agit des variables : le degré de différenciation, le degré d'accès visuel et la complexité de la configuration spatiale.

Bien sûr, les arguments théoriques prennent tout leur sens si elle s'appuie sur des preuves empiriques et dans nombreux cas, le travail empirique sert comme fond pour la théorie.

Plusieurs chercheurs ont utilisé l'environnement comme variables prédictives pour wayfinding :

- Braaksma et Cook[BRA80] ont décrit des bâtiments terminaux comme des nœuds connectant le réseau où les origines et les destinations sont des nœuds et la visibilité entre eux soit directement ou à travers des signes. En mesurant la connectivité de tel graphe, les indices de visibilité entre les endroits à l'intérieur de dix aéroports ont été développés. Des entretiens informels avec des clients dans deux aéroports montrent que les problèmes de wayfinding ont été associés à des zones avec des faibles indices de visibilité.
- En 1981 Weisman a utilisé 73 rapports sur wayfinding dans dix bâtiments d'une université et a constaté que la simplicité de la configuration du plan d'étage qui a été évalué par 100 juges était un prédicateur important pour wayfinding. Plus tard, en 1989, il a traité wayfinding d'un point de vue perceptuel et cognitif. Et il a proposé quatre types d'information environnementale importante : les signes et des chiffres, la différenciation architecturale, l'accès perceptif et la configuration du plan.
- Plus tard, Michael O'Neil[MIC91a] a mesuré la complexité de la configuration par le nombre moyen des connexions topologiques par point de passage dans un plan d'étage. Il a appelé « Inter-connexion Density » (ICD). Ceci a été utilisé comme une mesure dépendante pour tester wayfinding et la cognition environnementale. Pour l'expérience, O'Neill a utilisé 63 étudiants volontaires et trois sections indépendantes d'un édifice d'une bibliothèque. Utilisant les schémas, les photographies et les tâches actuelles de wayfinding, il a constaté qu'en la complexité du plan topologique d'étage augmente, les gens ont tendance de rencontrer plus de la cognition et des difficultés de wayfinding.
- Peponis, Zimring et Choi[PEP90] ont utilisé la théorie de la syntaxe spatiale pour examiner le comportement de la recherche spatiale. Ils ont demandé à 15 participants d'explorer un petit hôpital d'une façon libre ou une exploration ouverte, puis ils ont leur demandé de trouver plusieurs endroits dans une recherche dirigée. Les chercheurs ont enregistré leurs itinéraires pour les deux phases et ont trouvé que l'accessibilité des participants dans la recherche ouverte est fortement prédit par la mesure de la syntaxe spatiale appelé

‘Intégration’. aussi, quand les gens étaient perdus, ils ont également utilisé des chemins «intégrés». Cette recherche propose que les gens utilisent un ensemble abstrait de relations globales au sein de l’environnement au cours du processus de wayfinding. Cependant, il n’est pas clair s’ils ont également inclus ces relations dans leur processus cognitif sous il y a un développement progressif de la compréhension des relations spatiales les plus immédiates aux relations globales. La question essentielle dans cette situation est : est-ce que ces relations globales abstraites servent au wayfinding à travers des représentations cognitives ou s’agissent directement d’une manière écologique ?

- En 1992, Willham [WIL92] reproduit l’étude de Peponis et encore quantifie la description des espaces. Il ré-analyse les données d’origine pour étudier si d’autres mesures sont influencées sur le processus de wayfinding et également reproduit l’expérience en utilisant le même bâtiment et la même méthodologie avec 12 personnes âgées. Sa description des espaces intérieurs considère des relations locales et des paramètres globales. Les paramètres locaux incluent les caractéristiques des espaces eux-mêmes, les paramètres relationnels ont été dérivés de relations visuelles avec des espaces adjacents et les paramètres globaux ont été calculés à partir de la relation avec tous les espaces du système. Willham note que quand les gens passent plus de temps dans le local plus la prédiction est plus puissante de leur choix d’itinéraire pour décaler des qualités spatiales locales aux globales.
- Plus tard [SEI99] a utilisé une méthodologie similaire dans un hôpital urbain plus vaste et plus complexe avec les données recueillies à partir de 32 jeunes participants, il est aussi trouvé que l’intégration est un prédicteur important de wayfinding. En plus, il a affirmé que car wayfinding est un comportement conscient pour choisir les chemins, et ainsi que les valeurs syntaxiques sont fortement corrélées avec utilisation de ces chemins pour wayfinding, alors la syntaxe spatiale pourrait également être un outil utile pour étudier la cognition environnementale. Haq également a montré que les corrélations avec l’augmentation de la familiarité de l’utilisation de l’espace et des variables globales ont augmenté tandis que les corrélations avec les variables locales ont diminué.

Ces études indiquent que le schéma global de configuration est important pour prédire les tendances de recherche de Wayfinders. Ils semblent apporter des précisions sur le rôle du choix et de la complexité dans les bâtiments.

3.2.2. Les modèles écologiques de wayfinding

Plusieurs modèles de wayfinding sont basés sur l’approche écologique de [GIB79] de perception. Gibson traite la relation entre l’environnement et le comportement, comme la locomotion, à travers son concept d’affordances. Il a défini les affordances comme la mesure des

interactions potentielles entre un organisme et son environnement immédiat. L'information environnementale est directement perçue et la réaction sur l'environnement ne nécessite aucune intermédiaire cognitive. L'information sur l'environnement sera perceptible au cours du temps tant que la personne se déplace à travers l'environnement.

Heft [HEF83] a noté que les informations essentielles pour wayfinding se révèlent lorsqu'un individu se déplace dans l'environnement comme une série de vues successives et une séquence de transitions entre les vues. Dans le point de vue de Heft, un itinéraire peut également être décrit comme deux séquences d'informations imbriquées : une séquence de vues et une séquence de transitions qui relient ces vues. En outre, Heft a affirmé que les transitions sont plus importantes car elles servent à donner une continuité des vues.

C'est là où on peut faire une distinction avec les modèles cognitifs. Alors que les chercheurs cognitifs croient que la transition entre les vues est un acte cognitif, les chercheurs gibsoniens comme Heft affirment que la continuité de l'information environnementale distincte est fournie par une séquence invariante de transitions.

3.3. Modélisation du comportement de wayfinding

3.3.1. La cognition spatiale humaine

L'objectif de ce travail est de simuler le comportement de wayfinding des piétons dans les environnements urbains inconnus. Nous devons donc représenter les aspects pertinents du monde physique et intégrer les éléments et les concepts de la perception spatiale de l'homme et de la cognition en utilisant les méthodes de la syntaxe spatiale et le modèle multi-agent.

La cognition spatiale humaine est une partie de l'interdisciplinarité et donc de grande envergure dans le domaine de la recherche des sciences cognitives. Des chercheurs de nombreuses disciplines, comme la psychologie, la linguistique, l'anthropologie, la philosophie et la science informatique étudient le cerveau humain, son raisonnement, ses expériences et comment il conceptualise le monde dans lequel ils vivent. En particulier, la science cognitive est concernée par l'étude de l'intelligence humaine dans toutes ses formes, de la perception et de l'action au langage et le raisonnement. L'intelligence peut être définie comme la pensée rationnelle et la pensée comme l'être humain, i.e. *“the ability to attain goals in the face of obstacles by means of decisions based on rational (or truth-obeying) rules”*.

L'agent spécifié dans ce travail est capable de percevoir, de décider et d'agir, le modèle de flux d'information de l'espace et la cognition géographique, qui se compose de quatre étapes : acquisition des connaissances géographiques, les représentations mentales

des connaissances géographiques, l'utilisation des connaissances et la communication de l'information géographique. Les trois premières étapes ont été également données comme des éléments de la cognition. Ce mémoire porte sur deux d'entre eux : la modélisation de l'acquisition de l'information par l'agent à partir de son environnement et l'utilisation de ces connaissances dans le monde pour accomplir le processus de wayfinding.

La connaissance est un terme dans le monde qui se réfère à des informations externes. La plupart de la connaissance des gens nécessaire pour faire fonctionner les choses et faire certaines tâches se trouve dans le monde et donc nous ne sommes pas obligés d'apprendre le tout et les stocker sous forme de connaissances internes ou des connaissances dans la tête pour une utilisation ultérieure. L'argument principal de Norman est de mettre les connaissances nécessaires dans le monde pour réduire la charge mentale des personnes et conduit donc à faciliter la convivialité des choses. Les performances des différentes tâches nécessitent différents compromis entre la connaissance du monde et des connaissances dans la tête. Pour le processus de wayfinding dans les environnements inconnus, la connaissance de l'environnement est une nécessité absolue ; car les gens n'ont pas déjà acquis des connaissances dans la tête sur cet environnement.

La cognition spatiale désigne à la fois les processus de perceptions et de conceptions qui sont impliqués dans la compréhension de l'environnement. Par conséquent, les théories de wayfinding doivent intégrer un lien entre la perception et la cognition pour servir comptes au l'expérience quotidienne des gens [ALI99].

3.3.2. Les cartes cognitives

Comme le mentionne Tversky en 1993 : « *Comme de nombreux concepts utiles, le terme de carte cognitive possède plusieurs acceptions _ conduisant _ d'inévitables contre-sens. Un des sens prédominants est que les cartes cognitives sont des constructions mentales sous formes de cartes qui peuvent être mentalement inspectés* » [ROM05]. Montello en 2002 reprend cette idée dans un état de l'art sur l'évolution des cartes cognitives au XX^{me} siècle. Pour lui, l'émergence du concept des cartes cognitives est intimement liée à l'évolution de la recherche sur la cartographie. Cependant cette vision est battue en brèche par de nombreux chercheurs, et notamment Tversky en 1993 et 2001 qui avance que les représentations mentales qu'un individu a d'un environnement possèdent des erreurs systématiques qui ne sont pas prises en compte par la notion de carte cognitive vue comme une imitation de carte géographique (notamment dans le cas d'environnement dont l'individu a une connaissance très partielle). Tversky introduit alors la notion de *collages cognitifs* _ qu'elle décrit comme un ensemble d'entités imagées de thématiques différentes dépendant de points de vue multiples. Par point de vue multiples, nous

entendons des images mentales construites à partir de différents systèmes de références : allocentrique et égocentriques. Klatzky définit les principes de bases de ces deux systèmes de référence [ROM05] :

- *Un système de représentation locative égocentrique* décrit une représentation spatiale à partir de la position et de l'orientation intrinsèque d'une entité.
- *Un système de représentation locative allocentrique* fait référence à un repère global de l'espace de représentation dans lequel tout point de vue perceptif est omis.

Ces collages cognitifs n'ont pas la cohérence spatiale des modèles issus de la cartographie, ils ne préservent notamment pas les informations métriques. Ils ne présentent pas non plus de relations spatiales cohérentes entre les différents éléments mis en jeu [ROM05]. Ce modèle est un modèle de représentation purement théorique il permet de prendre en compte les distorsions et erreurs systématiques inhérentes aux représentations mentales de l'environnement. Ces « distorsions » peuvent être regroupées en trois groupes majeurs :

- Les « *perspectives cognitives* » mettent en relief des erreurs commises dans l'estimation de distance. Holyoak et Mah ont demandé à un groupe d'étudiants de s'imaginer sur la côte est des États-Unis et à un second de s'imaginer sur la côte ouest. Ils ont demandé aux étudiants d'estimer les distances entre des villes regroupées en paires selon un axe est ouest.

Il s'est avéré que les étudiants qui maintiennent une perspective côte Ouest surestimaient les distances entre villes de la côte Ouest relativement à celles de la côte Est, et inversement pour les étudiants maintenant une perspective côte Est. Ceci peut être traduit par le fait que les distances entre deux objets proches du point de perspective apparaissent plus grandes que celle de deux objets éloignés du point de perspective [ROM05].

- *Les points de référence cognitifs* donnent lieu à une asymétrie dans le jugement des distances. Couclelis et Golledge examinent l'hypothèse du « *point ancre* » (ou *anchor point hypothesis*). Cette dernière consiste à dire qu'un individu se représente à un endroit relativement peu connu à l'aide d'un point de repère plus connu (ou *landmark*), et qu'il en est de même pour la description verbale de la situation d'une entité. Un individu a tendance à se référer associativement à un point de repère plus connu pour localiser une entité plutôt qu'en donner la localisation exacte.
- *Les problèmes d'alignement et de rotation* surviennent lorsque l'on adopte un système de référence allocentrique et que l'on demande de juger l'alignement de deux entités connues et presque alignées. Les représentations mentales tendent à être regroupées et un

individu les jugent souvent plus alignées qu'elles ne le sont. Tverskyen1981en donne un exemple à des étudiants qui l'on donne une carte du monde correcte et une carte du monde où l'Amérique latine est parfaitement alignée avec celle du Nord jugent dans leur grande majorité cette carte erronée comme étant la bonne carte [ROM05].

Toutes ces distorsions sont prises en compte dans le modèle des *collages cognitifs* du fait des différentes granularités de représentation des systèmes de référence adoptés le fait que les relations spatiales entre objets (métriques et topologiques) ne soient que très peu prise en compte. Cependant il existe deux propriétés des représentations mentales que les collages cognitifs ne prennent pas en compte : celles de *la représentation hiérarchique de l'espace* et de *la prépondérance de la topologie* par rapport à la géométrie. Hirtle et Jonides(1985) ainsi que McNamara (1989) ont établi que les représentations mentales de l'environnement qu'un sujet maintenait étaient hiérarchiques, ils ont mesuré cela grâce à une estimation des distances entre points de repères. Ils ont demandé à un groupe de 32 étudiants d'évaluer les distances entre des paires de points de repères : la distance entre des points de repères appartenant à une même zone étaient sous-estimés alors que celle entre deux points de repères appartenant à des zones différentes était surestimée. Knauff et al, ont quant à eux prouvé la prépondérance de la topologie sur les notions d'orientation et de métrique dans la verbalisation des configurations spatiales (topologie uniquement : 61.1%, topologie et autre notion 95.4%)[ROM05].

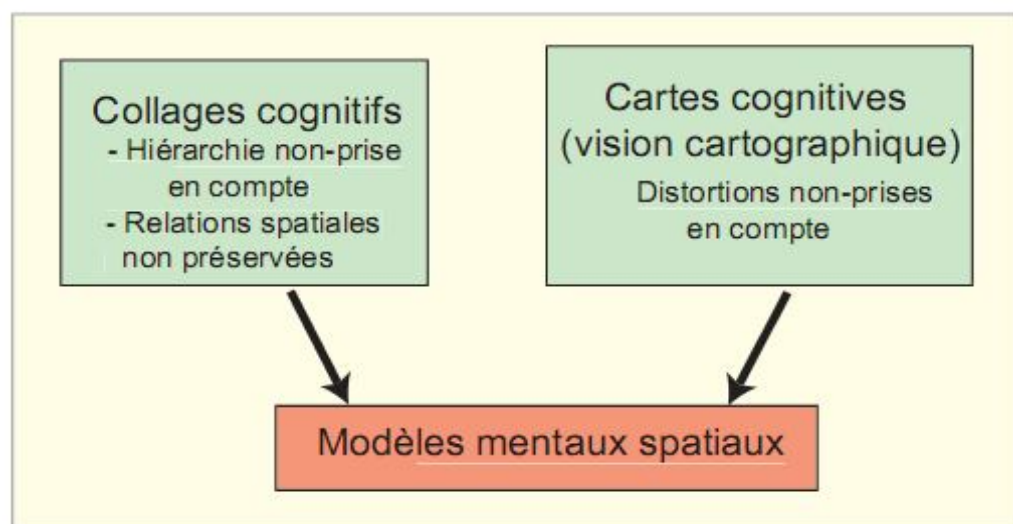


Figure.3.1 Trois modèles de représentation mentale des connaissances sur l'environnement selon Tversky[ROM05].

En tenant compte des inadéquations descriptives relatives aux modèles de cartes cognitives et de *collages cognitifs*, Tversky en 1993 propose la métaphore de *modèles mentaux spatiaux* comme label d'une représentation mentale de l'environnement prenant en compte les différentes

caractéristiques que nous avons mentionnées plus haut. À notre connaissance, il n'existe pas de définitions formelles de modèles mentaux spatiaux[ROM05].

Alors, on peut donner une définition générale pour la création d'une carte cognitive spatiale et sera celle donnée par Downs et Stea [DOW73] : « *Un processus composé de séries de transformations psychologiques par lesquelles un individu acquière, code, stocke, rappelle et décode des informations sur les positions relatives et les attributs d'évènements ou d'objets dans son environnement spatial quotidien* ».

3.3.3. Les heuristiques de navigation

Dans cette section, nous présenterons différentes heuristiques reconnues dans la littérature pour rendre compte de l'activité de navigation humaine [ROM05].

3.3.3.1. Les grandes heuristiques

Le tableau suivant décrit les grandes heuristiques propres à l'activité de navigation de l'être humain.

Tableau 3.1 – grands heuristiques propres à l'activité de navigation humaine

La recherche de chemins optimaux	Consiste à rechercher dans l'environnement, le plus court chemin en termes de distance euclidienne.
L'heuristique de déviation minimum ou de suivi des grands axes	Consiste à suivre les chemins les plus linéaires possible ou le navigant aux champs de vision le plus profond tout en minimisant l'angle entre le vecteur d'orientation courant du navigant et l'orientation estimée de la cible vue depuis la position courante du navigant.
Utilisation des points de repères	Le navigant peut se repérer dans l'environnement de différentes manières. Cependant Michel Denis et Ariane Tom ont démontré que la description d'itinéraire reposait essentiellement sur une prépondérance des points de repère.
L'heuristique des frontières	Est développée par Kuipers [Kui78]. Elle statue que lorsque un individu cherche son chemin dans un environnement il se dirige naturellement vers les zones dont la configuration maximise le nombre de frontières d'espaces visibles. Ce faisant il multiplie les chances de rencontrer d'autres espaces et donc d'augmenter le nombre d'informations disponibles pour planifier son chemin [ROM05].
La planification hiérarchique	A été développé_ très récemment par Wiener et Mallot en 2003. Elle établit qu'au moins de niveau de hiérarchies dans la carte cognitive sont utilisés pour la planification de chemins. Ils nomment les éléments respectifs de ces deux niveau : les places (granularité la plus fine) et les régions qui est un regroupement de places adjacentes. Pour eux la planification d'effectue localement au niveau de la place, tandis qu'en dehors de l'aire d'influence du point de repère local, la planification s'effectue entre régions. La figure15 donne un exemple de la représentation hiérarchique de Wiener et Mallot [ROM05].

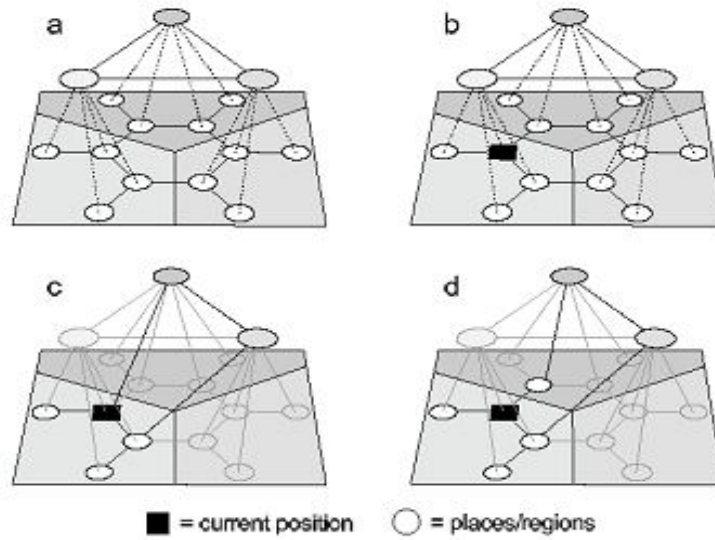


Figure.3.27 -Représentation mentale hiérarchique pour la navigation [ROM05]

À partir de cette représentation et des expériences impliquant des sujets humains ils dérivent un algorithme de navigation présenté dans la figure16.

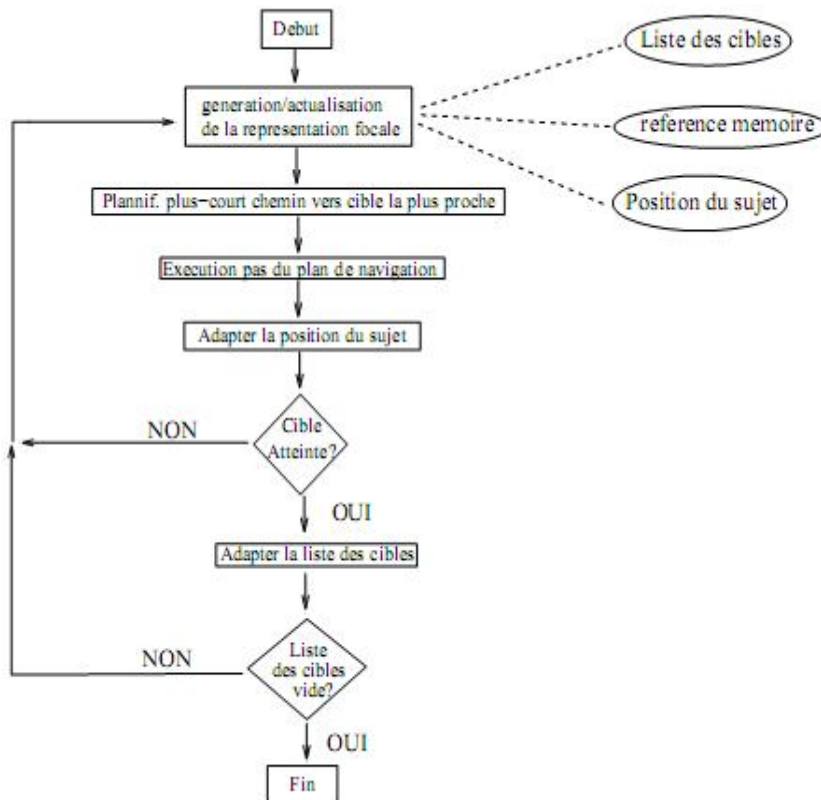


Figure.3.3-Algorithm de navigation de Mallot[ROM05]

3.3.3.2. Les axiomes d'Hochmair

Dans [ROM05] l'auteur a présenté les cinq axiomes de la simulation navigation en environnement virtuels :

- *L'existence de points de décisions* : Les points de décision sont les points où les navigants ont l'opportunité de sélectionner un chemin parmi d'autres. Dans un graphe topologique un point de décision est un nœud ayant une parité strictement supérieur à 2. Un arc est l'arc d'arrivée correspondant à la frontière par laquelle l'agent arrive dans l'espace. Il faut donc bien au minimum deux arcs supplémentaires pour créer un cas de décision pour l'agent [ROM05].
- *L'agent a un but* : L'agent doit avoir un but. Les représentations de la position de l'agent et du but doivent être activées dans sa carte cognitive. Le but est représenté une position estimée que l'agent doit atteindre. Le but est atteint lorsque la position estimée de l'agent coïncide avec la position estimée du but.
- *L'agent se déplace vers ce but* : L'axiome statue que l'agent se doit d'avoir un but et que l'on considère que l'agent a atteint son but lorsque la position réelle de l'agent coïncide avec la position estimée du but.
- *L'invariance de l'environnement* : L'impact d'un changement de configuration de l'environnement sur les erreurs de navigation est très fort [ALI99]. Hochmair 2002 élimine ce facteur d'erreur dans la navigation. L'axiome pose également que l'activité de recherche de chemins ne modifie pas l'environnement [ROM05].
- *L'ordonnement des actions* : Établit que les actions effectuées pendant la navigation doivent être ordonnées en une séquence pour se justifier Hochmair cite Arthur et Passini [AP98] : « Les décisions dans la navigation sont prises relativement les unes aux autres et sont ordonnées ».

3.3.4. Wayfinding

Les recherches dans le domaine de wayfinding étudient les processus qui ont lieu quand les gens s'orientent et naviguent à travers l'espace. Les théories tentent à expliquer comment les gens trouvent leurs chemins dans le monde physique, ce que les gens ont besoin pour trouver leurs chemins, comment ils choisissent les directions, et comment les capacités verbales et visuelles des gens influencent sur le processus de wayfinding.

Lynch a défini wayfinding comme basée sur l'utilisation cohérente et l'organisation des informations sensorielles précises qui vient de l'environnement extérieur. [ALI99] et [GOL99] décrivent le comportement de wayfinding comme un processus de précision, l'orientation et le mouvement qui est motivé par une origine vers une destination spécifique, qui ne peut être

perçue directement par le piéton. Un tel comportement implique des interactions entre le piéton et l'environnement. Le but principal de wayfinding est de trouver le chemin d'un lieu à un autre. Allen dénote que le piéton doit être en mesure d'atteindre une destination spécifique dans les limites des contraintes *spatiales* ou *temporelles*. Le processus de wayfinding se déroule dans des espaces de grande échelle. Ces espaces ne peuvent être perçus à partir d'un seul point de vue donc les gens doivent naviguer dans des espaces de grande envergure pour l'expérience.

Allen [ALI99] propose une taxonomie de la tâche de wayfinding basées sur des objectifs fonctionnels :

- navigation pour un objectif d'atteindre une destination familière,
- navigation exploratoire dans le but de revenir à un point familier d'origine,
- navigation avec un objectif d'atteindre une nouvelle destination.

Fewings [FEW04] souligne qu'il est possible de distinguer deux grands types de wayfinding :

- "le problème de choix statique" où les gens connaissent déjà l'environnement. Ils naviguent et prennent des décisions avec la connaissance préalable des résultats possibles,
- "le choix dynamique" où la prise de décision se fait dans un environnement inconnu par les visiteurs pour la première fois.

Le travail effectué dans ce mémoire se concentre sur la tâche de wayfinding à une nouvelle destination dans un environnement urbain non-familier et donc exclusivement sur la troisième des catégories d'Allen et en même temps sur la deuxième catégorie de Fewings.

3.3.5. Définition du wayfinding

Wayfinding est un terme que l'on attribue à Lynch [LYN60] qui le définit comme : « *a consistent use and organization of definite sensory cues from the external environment* ». Cette définition a évolué, et aujourd'hui, la définition de Gluck [GLU90] semble plus appropriée : « c'est le processus utilisé pour s'orienter et naviguer. Le rôle ultime du wayfinding est de se déplacer avec exactitude d'un point à un autre dans un large environnement ».

Deux écoles de pensée s'affrontent sur cette définition du wayfinding :

- D'une part il y a ceux qui interprètent ce concept comme un processus cognitif statique de recherche d'itinéraire, utilisant les cartes cognitives comme support à la résolution de problèmes spatiaux. Ils font ainsi une distinction entre la navigation qui se traduit par un déplacement/mouvement des personnes dans un environnement et le processus cognitif

permettant d'atteindre sa destination. C'est le point de vue adopté par des chercheurs comme Darken et Peterson: "*We know that what we often refer to as navigation is not merely physical translation through a space, termed locomotion or travel, but that there is also a cognitive element, often referred to as «wayfinding», that involves issues such as mental representations, route planning, and distance estimation.*". Et Bowman: "*We define navigation as the complete process of moving through an environment. Navigation has two parts: «wayfinding» (the cognitive decision-making process by which a movement is planned), and travel (the actual motion from the current location to the new location).*" ou encore Golledge[GOL99] "*wayfinding is the process of determining and following a path or route between an origin and a destination; it's a purposive, directed and motivated activity*". [SEI01].

- D'autre part, pour d'autres chercheurs, ces définitions réduisent le «wayfinding» à un rôle strictement cognitive, or comme le souligne Conroy c'est « l'acte de se déplacer dans un environnement est un composant nécessaire à notre connaissance de cet environnement, alors l'acte de wayfinding doit contenir en même temps le mouvement/déplacement et le processus cognitif ». Passini[PAS84], Arthur et Passini[ART92] partagent aussi ce point de vue où le rôle du wayfinding est d'atteindre sa destination tout en se déplaçant. Conséquemment, ces auteurs proposent plusieurs points à respecter pour tout processus de wayfinding :
 - Tenir compte de ses expériences précédentes.
 - Lire et évaluer le contexte environnemental.
 - Essayer de saisir les caractéristiques spatiales de l'environnement.
 - Prendre les informations disponibles sur le site (signes, panneaux, cartes, etc.).
 - Évaluer les différentes options.
 - Considérer le facteur temps, l'intérêt et la sécurité de l'itinéraire choisi.

Passini[PAS84] étaye sa définition du «wayfinding» et la classe comme le design, dans la catégorie des processus itératifs de résolution de problèmes: "*«wayfinding consists of finding one's way to a destination; spatial problemsolving comprising three interdependent processes: decision making, decision executing, and information processing.*" Ces trois processus s'inspirent des travaux de Downs et Stea[DOW77] qui insistent sur les mécanismes de rétroaction nécessaires à tout processus de wayfinding. Ainsi, selon ces derniers, le wayfinding se divise en 4 phases :

- *L'orientation* : définition de sa position dans l'environnement et de la destination à atteindre.

- *Le choix initial de l'itinéraire* : sélection d'un itinéraire avec point de départ et d'arrivée.
- *Surveillance de l'itinéraire (monitoring)* : vérification constante de l'itinéraire pris et l'évaluation et confirmations du choix de l'itinéraire.
- *Atteinte* de la destination.

Quant aux trois processus de [PAS84], ils peuvent être résumés ainsi :

- *Le traitement de l'information*. C'est-à-dire la perception et la connaissance de l'environnement qui permet les deux processus suivants. Passini insiste aussi sur le rôle déterminant de la carte cognitive comme source d'informations qui permet aux individus de prendre et d'exécuter des décisions.
- *La prise de décision*. Qui donne lieu à un plan d'action ou de décisions pour atteindre une destination donnée. Dans un nouvel environnement, on est confronté à un problème dont il faut trouver la solution ; ce qui se traduit par un plan d'action qui répond à ces trois questions : où, quand et comment. La décision se fait en fonction des informations disponibles et des habiletés des individus. [PAS84] rappelle que la théorie de la décision propose deux modèles. Le premier est le « modèle optimisé » dans lequel le sujet prend en considération les diverses options qui lui sont offertes (selon des critères subjectifs) et choisi une solution dite optimale. Le deuxième modèle, « modèle de satisfaction », ou l'individu choisit une solution qu'il juge acceptable. Pour l'auteur, ce second modèle semble être plus populaire pour les décisions complexes. Enfin le plan d'action est structuré et hiérarchisé servant ainsi d'aide-mémoire.
- *L'exécution de la décision*. Qui transforme le plan d'action en un comportement approprié dans l'espace. Le plan d'action est une solution mentale au problème de wayfinding. Les décisions doivent donc se transformer en action et en comportement pour qu'une personne puisse atteindre physiquement sa destination[SEI01].

De cette classification apparaît l'importance de la notion de récursivité dans le processus de wayfinding; d'où la définition de Conroy qui résume parfaitement ce concept : « *wayfinding is the act of travelling to à destination by a continuous, recursive process of making route-choices while evaluating previous spatial decisions against constant cognition of the environment* »[SEI01].

3.3.6. Les aptitudes individuelles et des connaissances spatiales pour wayfinding

Selon Golledge[GOL99], le processus de wayfinding se réfère à des facteurs cognitifs et des aptitudes comportementales des personnes pour trouver un chemin d'une origine à une destination. Ces capacités sont une condition nécessaire pour que les

gens utilisent les connaissances spatiales sur l'environnement, pour réaliser la tâche de wayfinding avec succès.

Selon Alien [ALI99], les aptitudes spatiales des gens sont dépendent principalement sur les quatre ressources interactives ci-dessous : les capacités perceptions, les capacités de traitement des informations fondamentales, les connaissances acquises précédemment et les capacités motrices.

Comme les capacités spatiales, les capacités cognitives dépendent aussi de la tâche à accomplir. Le processus de wayfinding dans un réseau routier utilise un ensemble différent de capacités cognitives. Les gens sont généralement bons dans l'application de leurs compétences individuelles à la tâche à accomplir. Si leurs compétences spatiales sont faibles, ils utilisent les aptitudes verbales pour naviguer, quand les gens se perdent, ils demandent généralement l'aide à quelqu'un.

Selon Siegel et Wite [SIE75], les connaissances spatiales humaines de l'espace géographique sont développées en trois étapes successives :

- les connaissances sur les points de repères
- les connaissances sur les itinéraires qui mettent les points de repères en séquence.
- Les connaissances sur les configurations qui permettent aux gens de localiser les points de repères et les itinéraires.

Montello [MON98] propose un nouveau cadre pour l'acquisition de connaissances spatiales dans des environnements à grande échelle. Il affirme que les étapes avec des points de repère pur ou les connaissances sur l'itinéraire n'existent pas. Il n'y a pas de changements qualitatifs entre les deux formes de connaissances, métriques et non-métriques parce que la connaissance métrique est obtenue dès le début du processus d'acquisition, puis encore accumulé et raffiné [SEI01].

3.3.7. Le raisonnement spatial et la prise de décision

Au lieu de faire des calculs exacts, les gens appliquent des méthodes qualitatives de raisonnement spatial [FRA92], [FRA96], [FRE92] qui reposent sur des grandeurs relatives au lieu de valeurs absolues. Quand les gens perçoivent l'espace à travers différents canaux, ils arrivent à différents types d'informations qui sont généralement de nature qualitative.

Les gens ne se déplacent pas dans l'environnement à l'aide de règles. Lors de la visualisation d'une scène, le résultat est une image rétinienne qui est de nature quantitative, mais la connaissance des gens sur la scène est qualitative [Fre91]. Freksa affirme que ces connaissances sont exactement ce que les gens ont besoin pour le processus de raisonnement spatial et mentionne trois avantages : puissance expressive de contraintes qualitatives basées sur l'interaction, indépendance par rapport aux valeurs et à l'échelle spécifiques et invariance par transformations.

Les gens utilisent l'information topologique au lieu de l'information métrique. Propriétés topologiques des objets restent invariantes sous ces transformations comme translations, rotations et mises à l'échelle. En utilisant l'analyse géométrique abstraite Piaget et Inhelder [PIA67] ont démontré que les concepts spatiaux fondamentaux sont topologiques et non euclidienne. Ils ont montré que les enfants commencent à conceptualiser l'espace en construisant et en utilisant les relations topologiques élémentaires, comme : la proximité, la séparation, l'ordre et l'enceinte.

Le raisonnement spatial comprend une variété de méthodes de prise de décision et le comportement de choix [SEI01].

La théorie de la décision couvre une large gamme de modèles avec différents foyers à décrire comment les décisions pourraient ou devraient être prises et sur la spécification des décisions qui sont prises. Mathématiquement, une règle de décision est une fonction qui affecte une valeur à chaque alternative, en montrant ce qui se passera quand une stratégie particulière est adoptée. Les critères de prise de décision sont un ensemble de règles de procédure qui supervisent l'évaluation des résultats lorsque les règles de décision sont appliquées à une situation. Une stratégie contient des règles de décision qui cherchent un résultat de toutes les manières possibles de prendre une décision pertinente [SEI01].

3.3.8. Les modèles informatiques de wayfinding

Entre la fin 1970 et la fin des années 1980, plusieurs modèles informatiques de Wayfinding ont été développés. Ces premiers modèles sont des modèles de processus informatiques conçus pour simuler l'apprentissage des itinéraires et de résoudre les problèmes de planification d'itinéraire dans des environnements graphiques.

La plupart des modèles informatiques de wayfinding sont principalement concernés par les processus humains et visent à les interpréter par l'intelligence artificielle. Par conséquent, il est intéressant de voir quels sont les aspects de l'environnement qui sont importants ici [SEI01].

Parmi les modèles informatiques de wayfinding, citons : Le modèle de Kuiper [KUI78] qui a proposé TOUR.TOUR et qui est considéré comme le point de départ d'une théorie computationnelle de wayfinding. C'est un modèle de connaissances spatiales dont les concepts spatiaux sont basés principalement sur des observations et des interviews par son concepteur [LYN60], [PIA67]. Avec TOUR, Kuiper simule l'apprentissage et la résolution des problèmes tout en déplaçant dans un environnement urbain à grande échelle. Son centre d'intérêt est la carte cognitive dans laquelle la connaissance est divisée en cinq catégories : (i) les

itinéraires, (ii) *un réseau routier topologique*, (iii) *la position relative des deux endroits*, (iv) *la division des frontières*, et (v) *des régions contenant*. Cette connaissance est représentée par des descriptions de l'environnement, les positions actuelles et les règles d'inférence qui les manipulent. Les itinéraires sont décrits comme des séquences de paires vue-action. Parce que TOUR fait face avec la connaissance spatiale incomplète de l'environnement, [SEI01].

IELMERest un autre système de wayfinding qui se compose de trois modules : MAP, PLANNER et EXECUTOR.

Le PLANNER établit le plan pour aller de A à B en utilisant les informations de la route qui sont dans MAP, puis l'envoie à EXECUTOR qui devrait modifier le plan en fonction des connaissances quotidiennes et ensuite l'exécuter, après il revient au MAP pour les mises à jours.

Leiser et Zilbershatz [LEI89] ont proposé TRAVELLER qui est un modèle détaillé qui simule l'apprentissage des réseaux. Ce système commence avec une mémoire vide et des pistes entre les nœuds : origine et destination ainsi que les actions requises dans wayfinding. De cette manière un nœud dynamique est développé pour interconnecter le réseau. Lorsqu'il recherche des destinations, il cherche de nouvelles voies en effectuant une recherche en largeur d'abord. Tous les nœuds accessibles depuis le nœud d'origine sont scannés pour un nœud but, s'il est trouvé, alors la route est complétée, sinon il cherche dans un rayon croissant jusqu'à ce qu'il trouve la destination. Cette connaissance est ensuite traduite en une séquence de règles de production. Comme les humains, ce système ne sait pas à l'avance quels nœuds seront rencontrés mais apprend de l'expérience [SEI01].

NAVIGATOR est un autre modèle d'intelligence artificielle (AI), qui utilise à la fois l'information spatiale et la description non-spatiale des objets de l'environnement [GOP95]. Il contient un module d'environnement et un module cognitif qui recueille une représentation subjective d'un environnement. NAVIGATOR est basé sur des théories psychologiques et dans son développement il intègre les deux modules qui sont axés sur les activités humaines et leurs capacités. Dans ce modèle, les processus cognitifs liés à l'apprentissage spatial et l'utilisation de ces connaissances pour la navigation complètent deux vues d'un environnement d'une banlieue. La carte cognitive est modélisée par un réseau hiérarchique constituée de : nœuds, liens, sous-nœuds, et sous-liens. Le processus du modèle analyse la récupération des connaissances spatiales et l'orientation particulière en utilisant les mesures suivantes : voir si l'objectif est atteint, quantité de temps nécessaire pour atteindre l'objectif, la qualité de correspondance (pattern matching) entre l'information dans la mémoire et les informations de but et enfin les erreurs de navigation et les stratégies de recherche. [SEI01].

O'Neill(1991)présente un modèle de la cognition spatiale et de wayfinding qui repose sur l'approche biologique. NAPS-PC (Network Activity Processing Simulator 'PC' microcomputer version) construit un réseau de neurone des points à choisir et des liens connectant ses nœuds avec la préservation de leurs relations topologiques. La recherche d'un chemin commence en stimulant les nœuds de début et de fin de leur activité maximale. L'activité se propage de ces deux nœuds à travers le réseau jusqu'à ce qu'elle croise. Nœuds entre-deux qui s'activent sont considérés comme sous-but au cours de la recherche [SEI01].

Tous les modèles informatiques essaient de concevoir des systèmes intelligents qui sont capables de trouver leur propre chemin. Ces modèles ne considèrent pas seulement les capacités humaines et les caractéristiques de l'environnement, mais aussi les interactions entre eux.

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté, dans un premier temps, le processus de wayfinding comme un domaine de recherche où les chercheurs sont divisés en deux groupes :

- Le premier groupe considère wayfinding comme un processus cognitif qui dépend de la carte cognitive humaine où ils ont prouvé leur point de vue par des modèles théoriques qui ont donné lieu à l'apparition des modèles informatiques par la suite.
- Le deuxième groupe suppose dans ses études que le processus de wayfinding n'est plus un processus cognitif, mais il est basé sur la perception de ce qu'il existe dans l'environnement et considère le processus de wayfinding comme un ensemble successif de transitions.

Dans un second temps, notre intérêt s'est porté sur la cognition spatiale, le raisonnement spatial et leur relation avec le wayfinding.

À partir de cette étude, nous pouvons conclure que le processus de wayfinding est un processus hybride où il peut être cognitif et écologique en même temps. Ceci se justifie par deux faits marquants :

- le premier quand l'environnement est inconnu pour le piéton. Dans ce cas, nous pouvons dire que le processus de wayfinding est beaucoup plus écologique, dans l'autre cas où l'environnement est connu pour le piéton,
- le second lorsque ce dernier a déjà des connaissances sur cet environnement et il les utilise pour trouver son chemin. Dans ce cas, nous pouvons confirmer que le processus de wayfinding est cognitif.

Afin de contribuer modestement dans ce courant de recherche sur le wayfinding, nous proposons dans le chapitre suivant un modèle pour le processus de wayfinding dans un environnement non familier basé sur l'application la technique de la syntaxe spatiale.

Chapitre 4 : Wayfinding à base de la syntaxe spatiale

4. Wayfinding à base de la syntaxe spatiale

4.1. Introduction

Le processus de wayfinding semble à être le déplacement d'un endroit à une destination. Le processus de wayfinding implique plusieurs facteurs qui forment un ensemble complexe de variables. Beaucoup de recherches ont été prises dans diverses disciplines, en particulier dans les domaines de l'environnement, le comportement et l'informatique pour étudier les principes et les facteurs liés à un Wayfinding efficace.

Un constat que nous formulons à l'issue de la revue bibliographique sur la recherche axée sur le wayfinding est qu'il n'y a pas de méthode systématique en ce sens à ce jour.

Par ailleurs, la modélisation du processus de Wayfinding explore les interactions dans ce processus et permet l'examen des facteurs qui sont les plus importants et qui influent sur ce processus. Des études cognitives et des modèles de Wayfinding cherchent à comprendre les variables et des processus psychologiques tels que : la cartographie cognitive, le raisonnement spatial et la prise de décision. Dans ce contexte, plusieurs modèles sont développés pour modéliser le processus de wayfinding pour l'être humain et la plus part de ces modèles sont basés sur l'intelligence artificielle et la représentation mentale de l'environnement : c.-à-d., comment les configurations de l'environnement sont représentées dans le cerveau humain. Parmi ces modèles informatiques de wayfinding, figure le modèle de Kuiper [KUI78] qui a proposé TOUR qui est un modèle de connaissances spatiales dont les concepts spatiaux sont basés principalement sur des observations [LYN60, [PIA67], et des interviews réalisés par son concepteur. Avec TOUR, Kuiper simule l'apprentissage et la résolution des problèmes tout en déplaçant dans un environnement urbain à grande échelle. Son centre d'intérêt est la carte cognitive dans laquelle la connaissance est divisée en cinq catégories : (i) les itinéraires, (ii) un réseau routier topologique, (iii) la position relative des deux endroits, (iv) la division des frontières, et (v) des régions contenant. Cette connaissance est représentée par des descriptions de l'environnement, les positions actuelles et les règles d'inférence qui les manipulent.

Les itinéraires sont décrits comme des séquences de paires vue-action. Parce que TOUR est confronté à une connaissance spatiale incomplète de l'environnement [SEI01], ce modèle modélise la représentation mentale de l'environnement.

Dans ce contexte et en lumière des études récentes que des chercheurs dans le domaine de l'urbanisme et de planning ont prouvés et expliqués l'effet et l'influence des configurations spatiales sur les décisions de l'être humain dans un environnement urbain.

Enfin, l'émergence de la théorie de la syntaxe spatiale a permis à plusieurs chercheurs dans le domaine de la cognition spatiale d'étudier le processus de wayfinding, et beaucoup de travaux sont effectués dans ce courant de recherches scientifiques en appliquant cette théorie mais la plupart de ces travaux sont empiriques et sont basés sur des expérimentations sur terrain. Ces chercheurs ont déduit que la syntaxe spatiale explique et interprète le mouvement des piétons dans les milieux urbain.

Partant de ce second constat et dans le but de modéliser le processus de wayfinding, nous proposons, dans ce chapitre, une alliance entre ce processus et la théorie de la syntaxe spatiale pour développer un modèle qui explore l'effet de certains paramètres de la syntaxe spatiale sur le comportement du piéton en milieu urbain. Et pour enrichir les modèles précédents par l'addition d'un nouveau concept ou plutôt module qui s'intéresse à l'effet des configurations spatiales sur la prise de décision du piéton.

Conséquemment, ce quatrième chapitre est, alors, dédié à la description détaillée de ce nouveau modèle. Cette description est précédée, logiquement, par une présentation de l'architecture globale de ce modèle avec une illustration de l'application de la syntaxe spatiale et comment le piéton choisit son chemin.

Ensuite, nous décrivons en détail comment appliquer le logiciel Repast Symphony pour créer les différents composants ainsi que les couches du modèle proposé.

4.2. ABM : Modélisation à Base d'Agent

4.2.1. Définition

ABMS (Agent-Based Modelling and Simulation) est une méthode de modélisation de systèmes, souvent complexes, comportant des agents autonomes et interactifs.

Un modèle ABM typique comporte trois éléments : (i) un ensemble d'agents possédant des caractéristiques et des comportements, (ii) un ensemble de relations et d'interactions entre les agents et (iii) un environnement dans lequel les agents évoluent

4.2.2. Environnement

Les agents peuvent interagir avec d'autres agents ou avec l'environnement qu'est une source d'informations pour les agents, que ce soit leur position dans l'espace ou relativement à d'autres agents ou encore des ressources à disposition.

L'environnement peut être modélisé par une simple matrice de Von Neumann, un espace euclidien en 2D ou en 3D voir une topologie réseau complexe. L'environnement définit donc l'emplacement, les capacités d'interactions ainsi que certaines connaissances d'un agent. [POU11].

4.2.3. Agents autonomes

La seule caractéristique la plus importante d'un agent est sa capacité d'agir de manière autonome et agir sur lui-même sans orientation externe pour répondre à des situations qu'il rencontre. Les agents sont dotés de comportements qui leur permettent de prendre des décisions indépendantes. Typiquement, les agents sont actifs, initient leurs actions pour atteindre leurs objectifs internes [MAC10].

Jenning [JEN00] donne une définition informatique de l'agent où il met l'accent sur le caractère de comportement autonome. Certains auteurs considèrent tout type de composant indépendant (logiciels, modèle, individu, etc...) est un agent [BON01].

D'autres auteurs insistent que le comportement de composant doit être souple, capable d'apprendre et de changer ses comportements en réponse à ses expériences.

À partir de différentes définitions qui existent dans la littérature, on considère que l'agent a certaines caractéristiques essentielles [MAC10] :

- Un agent est modulaire et a un identifiant unique. L'exigence de la modularité implique qu'un agent a une limite.
- Un agent est autonome et autodirigé. Un agent peut fonctionner d'une manière autonome dans son environnement et ses interactions avec d'autres agents, au moins sur une plage limitée de situations qui sont intéressantes dans le modèle.
- Un agent a des comportements qui lient des informations détectées par l'agent et ses décisions et actions.
- Un agent a un état qui varie au fil du temps.
- Un agent est social ayant des interactions dynamiques avec d'autres agents qui influencent son comportement.
- Un agent est adaptatif
- Un agent peut avoir la capacité d'apprendre et d'adapter ses comportements en fonction de ses expériences accumulées.
- Un agent peut être dirigé vers un but
- Les agents peuvent être hétérogènes : dans la simulation à base d'agents souvent on considère l'ensemble de la diversité de l'agent à travers d'une population.

4.3. Le modèle proposé

4.3.1. L'architecture globale du modèle

Le modèle proposé en principe est composé de trois composants principaux (figure 4.1) :

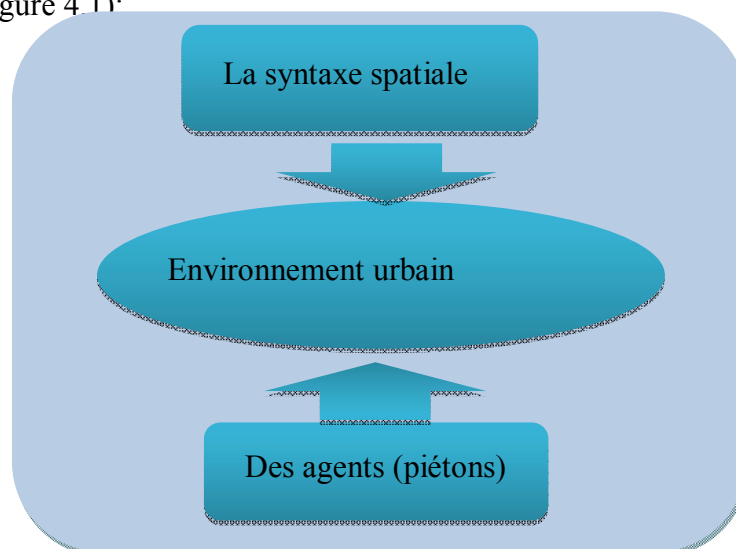


Figure.4.1 -Les composants du modèle

- i) *L'environnement urbain* qui représente l'espace où les piétons exécutent l'activité de wayfinding. Cet environnement englobe un ensemble des configurations spatiales telles que les routes et les bâtiments où les piétons habitent. Chaque une de ces configurations a ses coordonnées qui représentent leur localisation. Cette fonctionnalité est offert par la projection SIG de l'environnement de simulation qu'on a utilisé.
- ii) *Outil de la syntaxe spatiale* qu'est l'ensemble des relations et des calculs appliqués sur cet environnement pour définir les différents paramètres qui caractérisent l'environnement. Dans notre cas, on s'intéresse aux deux paramètres qui sont : la connectivité et l'intégration locale pour étudier l'influence de ces derniers sur le processus de wayfinding.

La figure suivante illustre une application de la syntaxe spatiale à une petite ville.

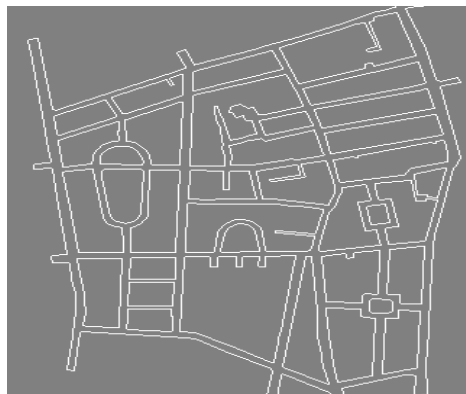


Figure.4.2 -Exemple d'un environnement urbain.

Application de la
syntaxe spatiale (la



Application de la
syntaxe spatiale



(A) L'environnement avec la connectivité (de plus connecté au moins connecté)



(B) L'environnement avec l'intégration locale (de plus intégré au moins intégré).

Dans la figure suivante on présente les étapes de la création de notre environnement urbain sous un SIG qui prend en compte les paramètres de la syntaxe spatiale.

Pour rappel, on a utilisé une ville « Toy city » présenté dans [NIC10] pour des fins de mise à jour du modèle proposé par ce dernier.

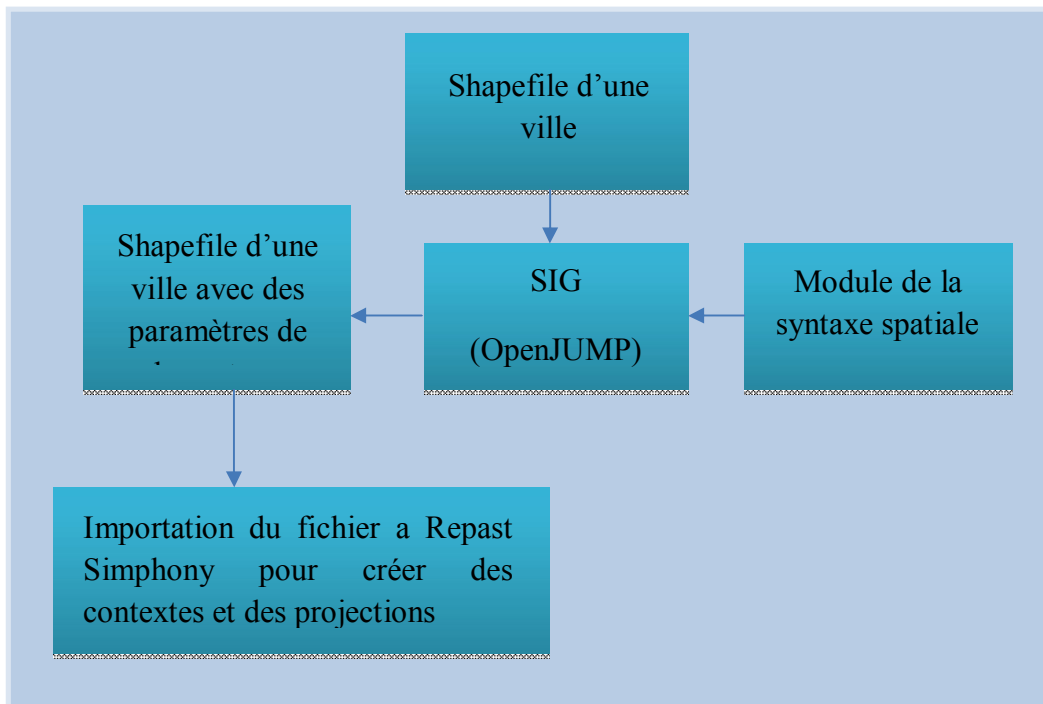


Figure.4.3 – l’intégration de la syntaxe spatiale dans un SIG.

Dans la figure ci-dessus on illustre le processus de l’intégration de la syntaxe spatiale dans le SIG, dans la section suivante on explique les composants de cette figure.

On a Cinque composants

- *Shapefile* : contient des données concernant la ville utilisée, les données qui nous intéressent sont celles des routes.
- *SIG (OpenJUMP)* : est utilisé pour le traitement spatial et l’édition des attributs du shapefile.
- *Module de la syntaxe spatiale* : est un module écrit en java, il construit un graphe à partir des figures spatiales de la ville (les routes) puis il calcule les paramètres de la syntaxe spatiale de chaque route.
- *Shapefile avec la syntaxe spatiale* : après le calcul des paramètres de la syntaxe spatiale ils sont ajoutés automatiquement aux attributs de chaque route.

- *Importation du fichier à Repast Simphony* : la dernière étape de la préparation de l'environnement est l'importation à la plateforme de programmation.

La première étape consiste à utiliser un SIG (OpenJUMP) qui est spécialisé pour éditer les données géographiques, puis importer le shapefile, on calcule les paramètres de la syntaxe spatiale des routes de la ville, on attribue à chaque route une valeur de la connectivité qui représente le degré de la connectivité de cette route aux autres routes voisins. Et une valeur de l'intégration locale qui représente l'intégration de chaque route dans le système urbain local (n= 3). La figure suivante illustre les valeurs des deux paramètres pour les routes de la ville :

ID	IDENTIFIER	Connectivi	LocalInteg
1	1 road1	4	2.2
2	2 road2	2	1.0559810533411202
3	3 road3	3	1.7740444122490533
4	4 road4	2	1.1634083318910207
5	5 road5	3	1.8333333333333333
6	6 road6	3	1.7239311883324127
7	7 road7	2	1.0559810533411202
8	8 road8	3	1.7451124978365318
9	9 road9	3	1.698245835016031
10	10 road10	2	1.1634083318910207
11	11 road11	3	1.7239311883324127
12	12 road12	4	2.2383870080053385
13	13 road13	3	1.7239311883324127
14	14 road14	3	1.8333333333333333
15	15 road15	2	1.273684376262023
16	16 road16	4	2.2383870080053385
17	17 road17	2	1.1634083318910207
18	18 road18	4	2.2117082319365493
19	19 road19	4	2.2117082319365493
20	20 road20	5	2.5978664619336738
21	21 road21	5	2.5978664619336738
22	22 road22	3	1.7239311883324127
23	23 road23	3	1.8333333333333333

Figure 4.4 – Ajouter l'intégration locale et la connectivité aux routes.

Une fois on a le shapefile avec des valeurs de la connectivité et de l'intégration locale, ce dernier sera importer a Repast Simphony, ensuite on va créer des contextes pour chaque ensemble des objets similaires. La figure ci-dessous illustre cette tâche :

- Le contexte principal englobe tous les autres contextes qui sont groupés en deux groupes : contexte pour les agents et contextes pour l'environnement.

- L'ensemble de ces contextes forme la ville virtuelle où les agents exécutent leurs tâche de wayfinding.

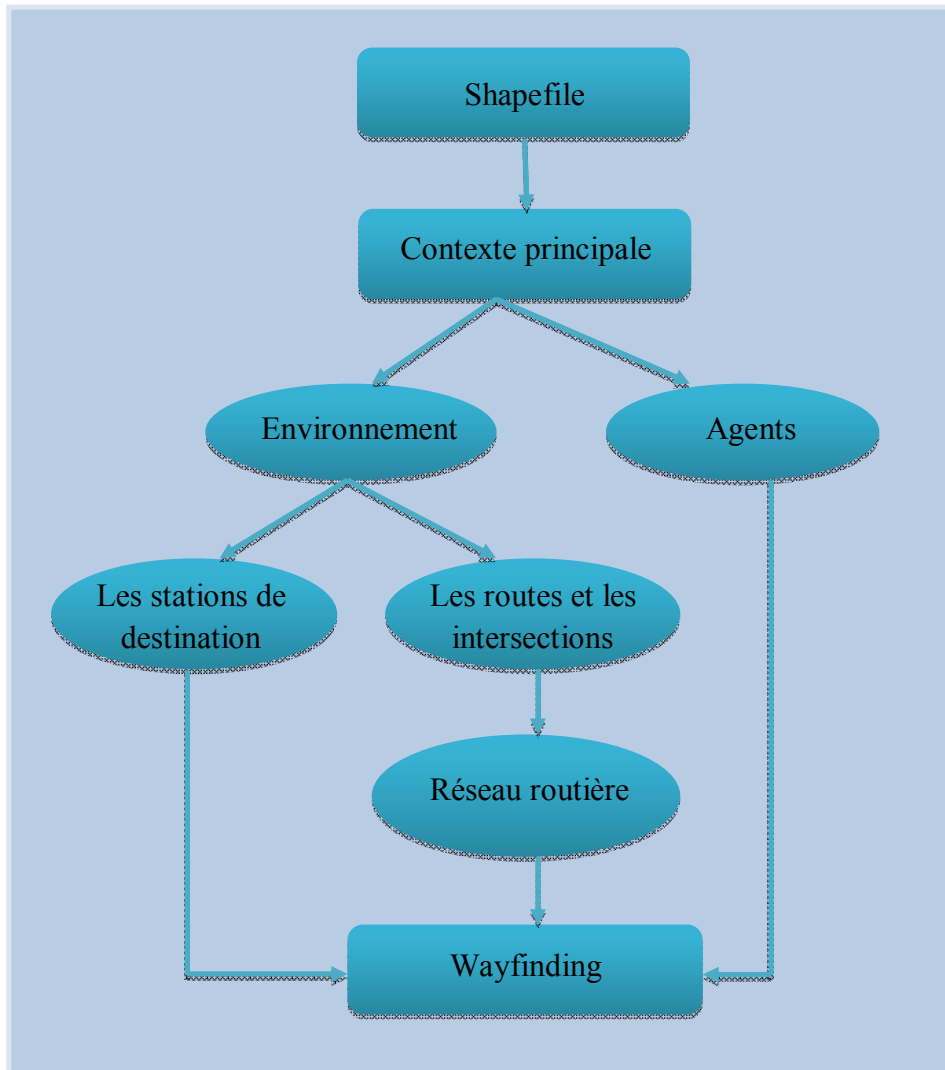


Figure 4.5 – vue globale sur la création de l’environnement à partir du shapefile.

- iii) *L’agent wayfinder (figure 4.6)* qui représente le piéton qui se trouve dans un environnement urbain non connu et cherche une destination précise. Cet agent se comporte de la manière suivante : la navigation sera réactive et à chaque point de décision qui est représenté par des intersections des routes, l’agent wayfinder cherche la route la plus intégrée dans le premier cas, et la route la plus connecté dans le deuxième cas. Dans les deux cas on cherche à calculer le nombre de tours effectués par l’agent pour atteindre la destination et le temps écoulé et même la distance ou bien la longueur de chemin. Une fois obtenue ces informations, on les compare pour conclure l’effet et les performances de ces deux paramètres dans le processus de wayfinding et on

essaye de proposer une façon de les combiner dans le but de proposer une philosophie ou bien une stratégie basée sur ces deux paramètres pour un wayfinding dans un environnement urbain.

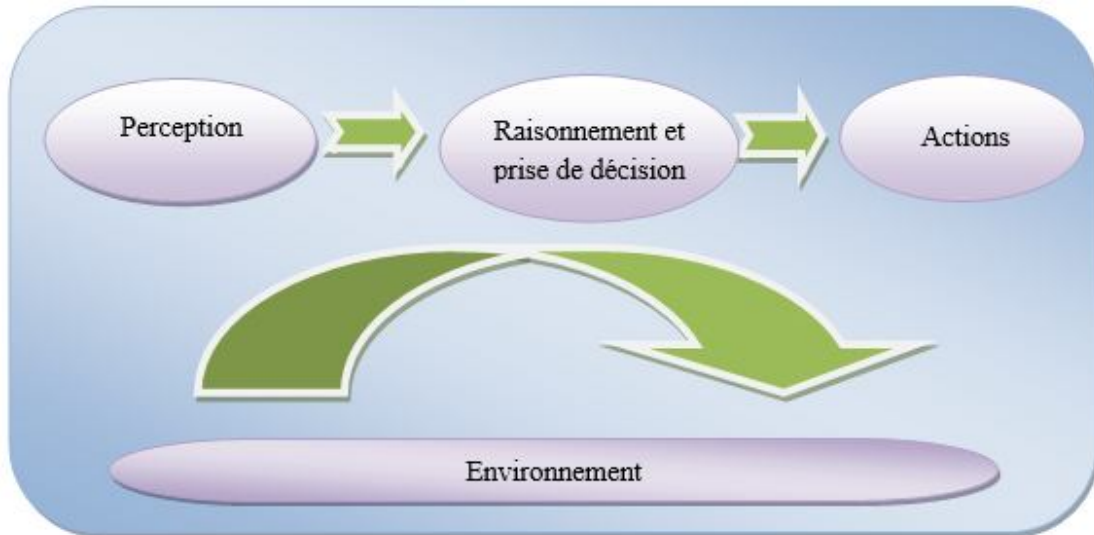


Figure.4.6 -L'architecture d'agent

L'agent wayfinder se compose de trois modules de base qui sont :

- *Perception* qui permet aux agents de percevoir l'environnement. Dans notre modèle les segments des routes (Roads), les intersections (Junctions) et les stations (destinations) sont les éléments qui composent l'environnement virtuel et ont une influence sur les décisions de l'agent.
- *Raisonnement et prise de décision* : l'agent dans la ville commence à chercher sa destination par explorer les routes qui sont à la portée de sa vision, les facteurs de base de choix des routes destinataires sont : la connectivité de la route et sa valeur d'intégration locale. En conséquence, les points de prise de décision dans l'environnement sont considérés des intersections des routes qui sont de trois types:
 - *Intersection de deux routes (A)* : la prise de décision dans ce cas est facile, l'agent continue la marche tout au long de la deuxième route quel que soit sa valeur de la connectivité et de l'intégration locale (figure 4.7).

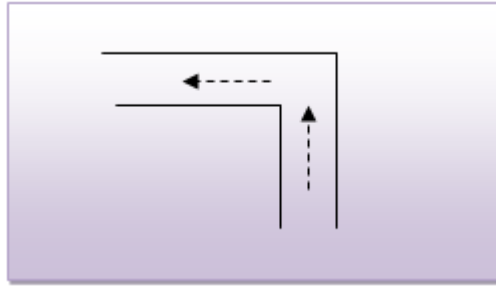


Figure.4.7 -Intersection de deux routes(A).

- *Intersection de deux routes(B)* : ici l'agent a deux choix. Il va choisir la route la plus connectée ou la plus intégrée pour aller à sa destination (figure 4.8).

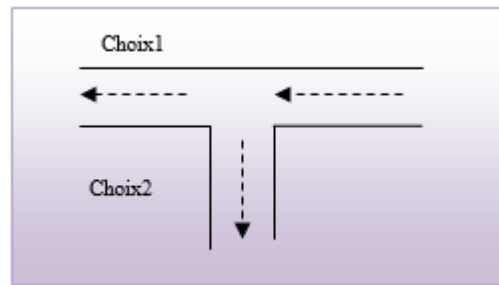


Figure.4.8-Intersection de deux routes(B).

- *Intersection de trois routes* : dans ce cas, le choix de la direction de l'agent dépendra des valeurs de la connectivité et l'intégration locale de chaque route (figure 4.9).

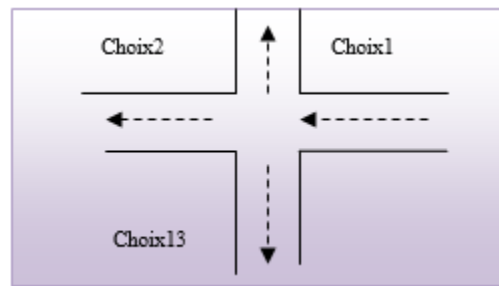


Figure.4.9 -Intersection de trois routes.

4.3.2. Les paramètres de la syntaxe spatiale utilisés

Les paramètres de la syntaxe spatiale choisie pour notre modélisation sont basés sur les études empiriques faites par plusieurs chercheurs. Ainsi, les résultats de recherches de Willham[WIL92], qui sont similaires à des études précédentes, montrent que les nouveaux arrivants à un certain environnement comptent sur des mesures locales de la

syntaxe spatiale pour le processus de wayfinding, mais avec le temps le piéton sera familier avec les mesures globales qui deviennent plus importantes.

Pour rappel, les mesures que nous avons choisies pour modéliser le comportement de wayfinding dans un environnement urbain non familier sont : l'intégration locale et la connectivité.

4.3.2.1. L'intégration locale

L'intégration locale représente l'accessibilité et la connectivité au sein d'une partie de l'ensemble du système spatial. Généralement cette valeur est calculée avec la profondeur égale à trois. Les recherches antérieures indiquent que l'intégration locale peut être interprétée par la hiérarchie de l'accessibilité et de la circulation locale des piétons.

Hiller et ses partenaires en 1987 sont les premiers qui proposent l'idée de représenter la structure spatiale en utilisant la mesure de l'intégration. Ils ont découvert que la corrélation entre l'intégration et les modèles de mouvement ont bien ce qui rend l'intégration comme une référence pour la prédiction des modèles du mouvement humain dans la réalité. Il est également souligné par certaines recherches montrent que le mouvement humain en termes de piétons et de véhicules peut être prédit par l'intégration locale [XIA13].

➤ *Les valeurs de l'intégration locale*

Dans notre modélisation nous avons pris le plan de la ville « Toy city » utilisé par [NIC08] et nous avons calculé l'intégration locale des routes de cette ville (figure 4.10).

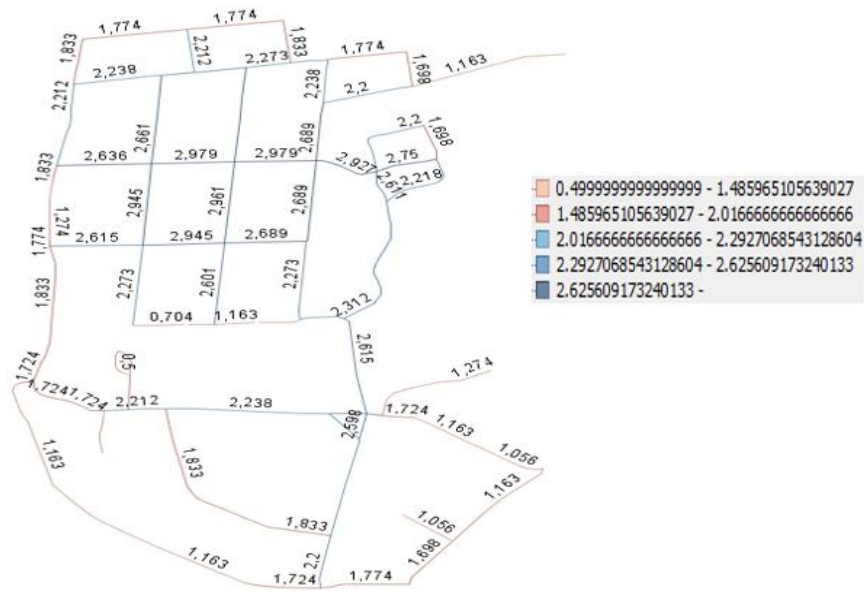


Figure.4.10 -Les valeurs de l'intégration locale pour « Toy city » utilisée dans le modèle.

4.3.2.2. La connectivité

BeatrixEMO [BEA12] a prouvé l'efficacité de la syntaxe spatiale dans la prise de décision spatiale. Ses résultats montrent que les routes les plus connectés sont les plus choisies par des piétons. Le but de notre modèle est de confirmer ces résultats.

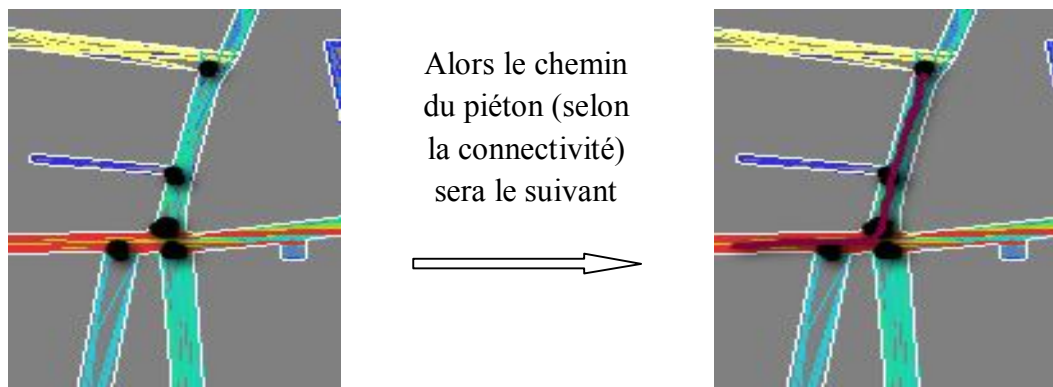
Les valeurs de la connectivité des routes de la ville « Toy city » utilisé par [NIC08] sont fournies par la figure 4.11.



Figure.4.11 -Les valeurs de la connectivité pour « Toy city » utilisée dans notre modèle.

Selon les études effectuées précédemment par les chercheurs de la cognition spatiale, l'application de l'analyse de la syntaxe spatiale sur l'environnement montre que le mouvement des piétons est beaucoup plus important dans les routes les plus intégrés et les plus connectés.

Ce constat est vérifié sur notre modèle où la figure ci-dessous présente un exemple d'application de la syntaxe spatiale sur une partie d'une ville avec la prédiction du chemin à prendre par les piétons à chaque fois. Bien sûr, le chemin peut être changé en fonction de l'état mental et en fonction d'autres facteurs qui ne sont pas traités dans ce mémoire.



(A) : les points de décisions

(B) : Le chemin du piéton

Figure.4.12-Un exemple des points de décisions dans un environnement urbain selon l'intégration locale et la connectivité

4.4. Le processus de wayfinding

La figure suivante présente l'architecture globale du modèle du wayfinding que nous avons conçu[HED14][HED13].

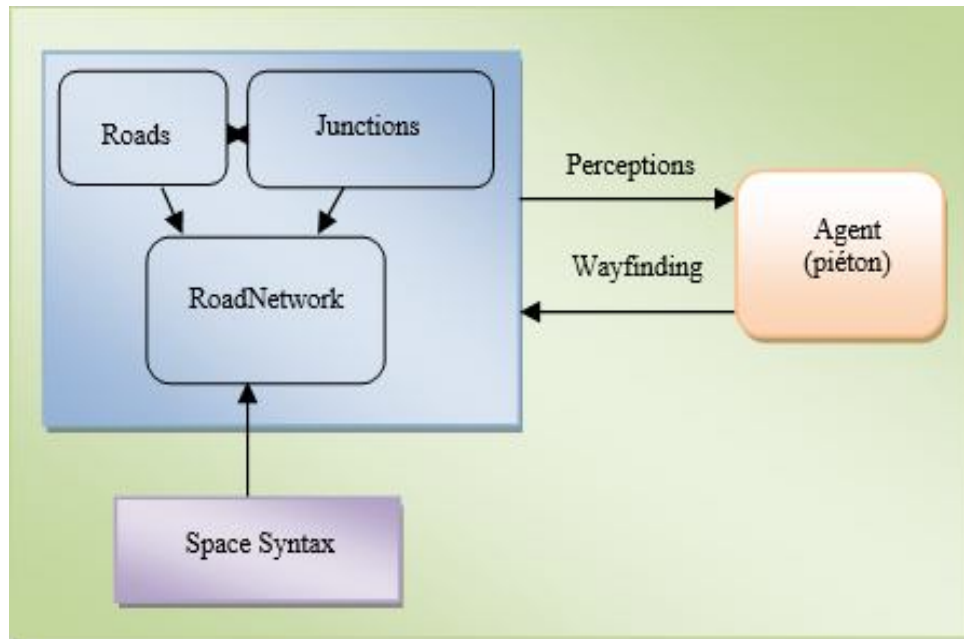


Figure.4.13 -Le modèle de wayfinding[HED14].

Les éléments clés de ce modèle sont : le RoadNetwork et l'agent piéton. Ils sont détaillés ci-après [HED14].

1. RoadNetwork

Le RoadNetwork est constitué de deux couches:Roads (routes) et Junctions.Roads (routes) sont des segments qui interconnectent entre eux alors que les Junctionssont des intersections entre les segments de la route et représentent les points de décision dans l'environnement. La combinaison de ces deux couches permet d'obtenir un réseau de routes. L'usage des paramètres de la syntaxe spatiale de ce réseau permet de déduire laroute choisie à chaque fois que l'agent rencontre une intersection.

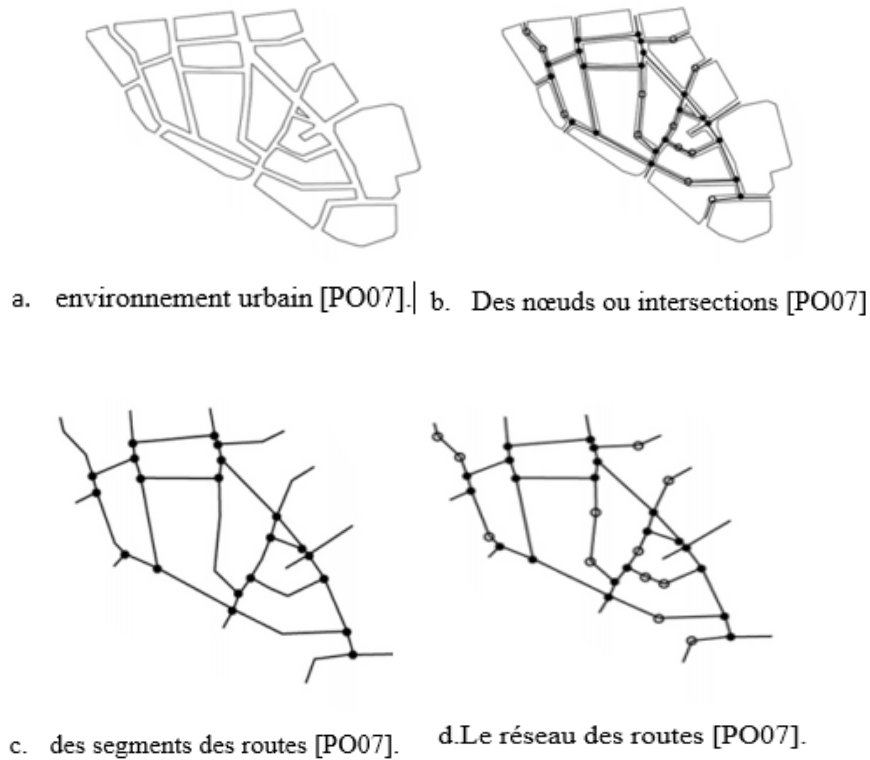


Figure.4.14 -Représentation du réseau des routes [OZB07].

2. L'agent wayfinder

Au départ l'agent choisi la route la plus proche de sa position ensuite il continu selon la valeur des deux paramètres où le choix se fait en se basant sur la valeur la plus grande. La route choisie par l'agent ne représente pas un chemin optimal parce que l'agent est dans un environnement non familier et il choisit seulement la route qui va le diriger vers la destination correcte bien sûr avec la contribution d'autres facteurs dans ce choix. Au fil du temps, l'agent construit sa carte cognitive.

Le modèle de wayfinding proposé dépend des paramètres de wayfinding ; mais en réalité ce processus ne dépend pas totalement des configurations spatiales car d'autres éléments peuvent participer dans ce processus. Dans notre modèle et du fait que nous sommes limité seulement à l'utilisation des paramètres de la syntaxe spatiale, l'agent wayfinder choisi son route en fonction de son destination et les paramètres de la syntaxe spatiale de chaque route.

Conséquemment, la formalisation que nous proposons pour le processus de wayfinding est la suivante :

$$\text{Wayfinding} = f(\text{DES}, \text{PSS}, \text{awareness}) \quad (8)$$

Notons enfin que la figure 4.13 fourni un survol de notre modèle que nous détaillons dans la figure 4.15.

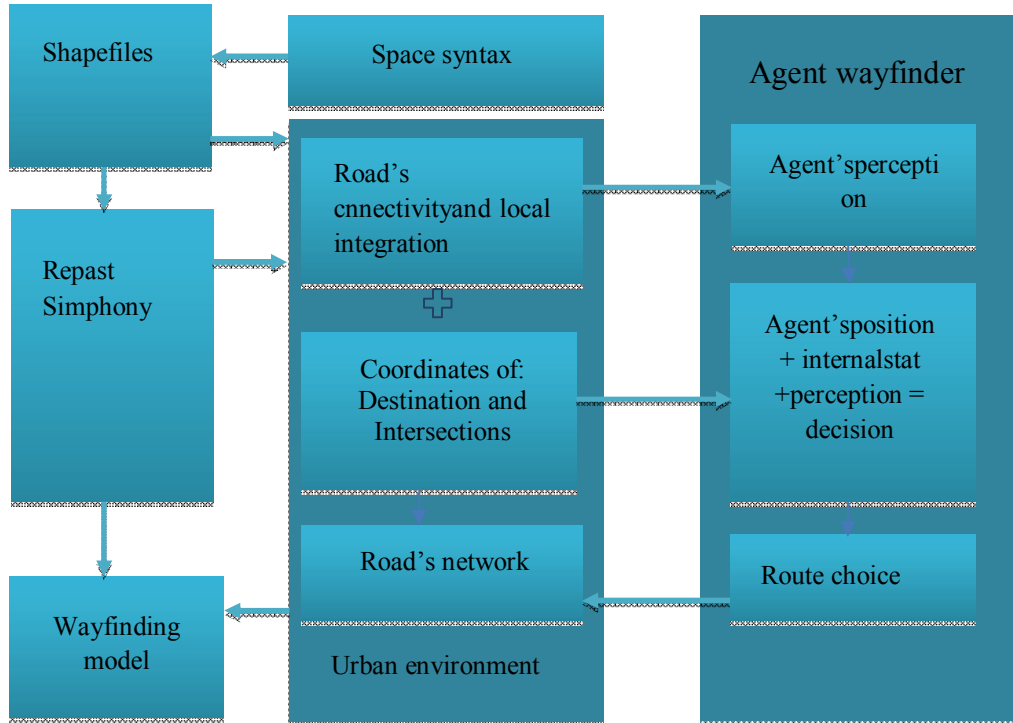


Figure.4.15 -Le modèle détaillé de wayfinding

Un examen rapide de cette figure montre que dans notre modèle, nous avons supposé que le piéton choisi le chemin à parcourir selon sa destination et en fonction des paramètres de la syntaxe spatiale ainsi que d'autres facteurs. Dans notre travail, notre intérêt s'est porté sur la destination du piéton et la valeur de l'un des paramètres de la syntaxe spatiale comme première tentative de notre contribution.

Étant donné que les piétons sont dans un environnement non connu, le processus de wayfinding selon notre proposition sera plus difficile et il dépendra de tous ce que le piéton voit dans l'environnement.

La figure suivante détaille l'architecture interne de l'agent :

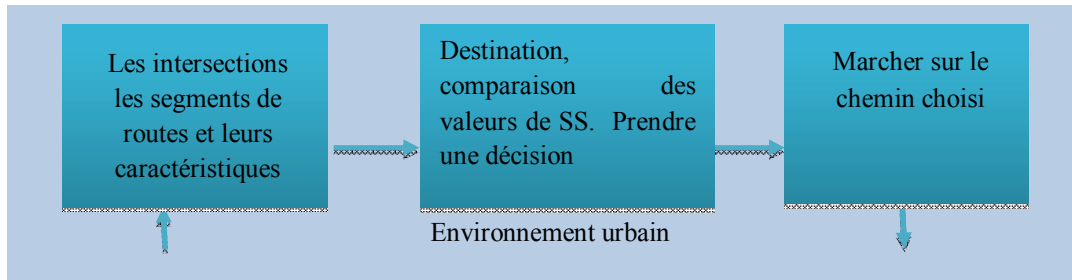


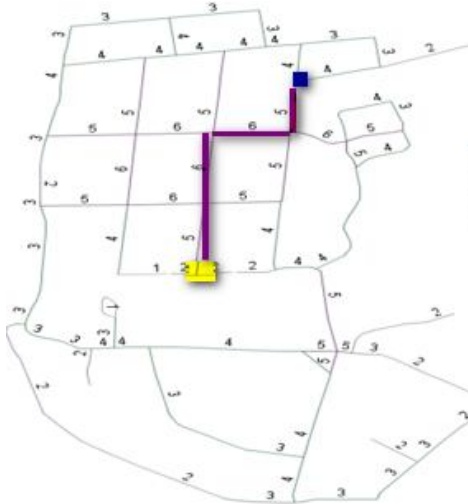
Figure.4.16 -L'agent wayfinder.

Dans notre modèle, chaque piéton a son propre profil et la destination peut être atteinte ou non selon la route choisie i.e. le paramètre choisit sa valeur dépend fortement de la connaissance de la destination. Si le piéton ne connaît pas la destination, il n'atteindra jamais son but selon notre modèle.



Selon notre modèle, la route choisie par le piéton est la route sur la figure ci-contre. Cette route est choisie selon les valeurs de l'intégration locale de chaque segment de route.

Figure.4.17 - La route par l'intégration locale.



Dans la figure ci-contre, la route choisie par le piéton est la route sur la figure qui a les valeurs de connectivité les plus élevées de chaque segment de route.

Figure.4.18 - La route par la connectivité.

Pour cet exemple, nous remarquons que la route choisie par la connectivité n'est pas tellement différente à la route choisie par l'intégration locale. C'est pour cette raison que notre tâche consiste à étudier, par la suite, les différences dans les deux cas.

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre modèle qu'est composé de trois éléments principaux : l'environnement urbain non familier, l'analyse appliquée à cet environnement qui est la syntaxe spatiale et l'agent wayfinder.

Puisque l'environnement se compose des routes et des intersections, nous avons intégré dans notre modèle les calculs des valeurs de la connectivité et de l'intégration locale de chaque route qui permettent à l'agent wayfinder de choisir sa route.

Notre objectif au travers cette modeste contribution est de voir comment les paramètres de la syntaxe spatiale ont une influence sur le mouvement des piétons.

Pour mettre en exergue les intérêts de notre modèle, le chapitre suivant sera consacré à sa validation moyennant sa simulation dans le but de montrer l'influence des deux paramètres retenus sur le choix de de la route.

Chapitre 5 : Implémentation et résultats

5. Implémentation et résultats

5.1. Introduction

Dans ce dernier chapitre nous présentons un instantané de l'implémentation de notre modèle. Ainsi et dans un premier temps, nous présentons l'environnement de la simulation que nous avons conçu. Dans un second temps, une vue générale sur la méthodologie utilisée pour la création de l'environnement virtuelle sera également présentée.

Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre nous présentons les premiers résultats obtenus sur l'intégration locale comme paramètre de prédiction du mouvement du piéton. Dans ce contexte et pour chaque capture d'écran, nous illustrons avec justification les positions des agents.

5.2. Repast Symphony

RepastSymphony est un ABMS open-source multiplateforme réalisé en Java. Il s'applique à la réalisation de modèles très flexibles. Il est intégré à l'environnement de développement Eclipse. RepastSymphony supporte des modèles sous différentes formes telles que :ReLogo, Groovy ou Java et propose une grande documentation en ligne[POU11].

5.2.1. Implémentation d'un modèle avec Repast Symphony

L'implémentation d'un modèle avec Repast Symphony se décompose en trois parties détaillées ci-après.

5.2.1.1. Agents

Chaque type d'agent est représenté par une classe comportant ses propriétés ainsi que ses comportements et interactions. Généralement, on définit une méthode `step()` spécifiant le comportement de l'agent à chaque itération[POU11].

5.2.1.2. Environnement

L'environnement est composé d'une ou plusieurs couches nommées espaces. Il existe plusieurs types d'espaces caractérisés par leur définition (espace euclidien, espace matriciel, etc...) ainsi que par leur contenu, agents et valeurs[POU11].

Les agents peuvent se déplacer dans les espaces qui les contiennent et peuvent utiliser et modifier le contenu des espaces de valeurs.

5.2.1.3. Contexte

Le contexte contient les agents et l'environnement. Il s'occupe également du déroulement de l'application en fournissant des outils de scheduling pour les différents comportements des agents afin de gérer leur fréquence et leur ordre [POU11].

5.2.1.4. Projection

Les projections sont créées pour des contextes spécifiques et contiendront automatiquement chaque agent dans le contexte (l'ajout d'un agent à un contexte implique son ajout dans toutes les projections qui ont été créés dans ce contexte)[NIC08].

5.3. Modélisation de l'environnement urbain virtuel

L'environnement virtuel sous Repast Symphony se compose :

- i) Des arcs qui représentent les routes de la ville virtuelle. Ces arcs sont caractérisés par des coordonnées fournées par la projection SIG. La couche des routes se compose de deux éléments (figure 5.1) : le contexte des routes (type « route ») et la projection SIG des routes qui représente les caractéristiques des éléments du contexte des routes (dans notre cas, ce sont les coordonnées de chaque route).

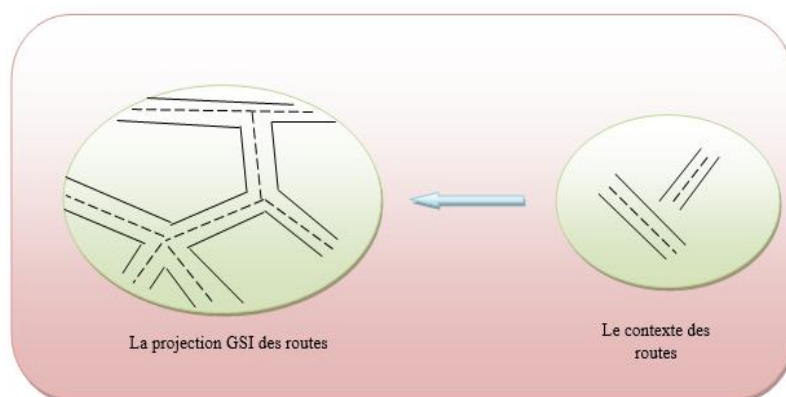


Figure.5.1 -La couche des routes qui constituent l'environnement virtuel conçue sous Repast Symphony [NIC10].

- ii) Les nœuds qui présentent les intersections des routes de la couche précédente. Ces nœuds représentés sous Repast Symphony (figure5.2) sont définis par : un contexte des

intersections qui contient le type « Intersection » et deux projections (la première projection est celle du network ou le réseau représente la relation entre les éléments du contexte des intersections et les connecte entre eux selon leur adjacence. La deuxième projection est celle du SIG qui représente les coordonnées des nœuds).

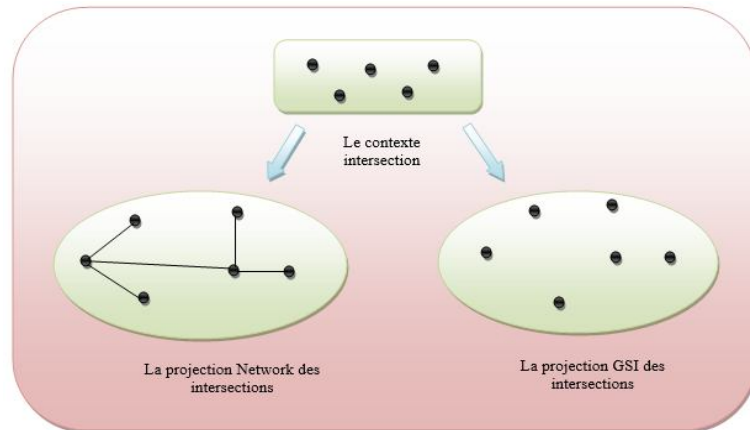


Figure.5.2 -La couche des intersections qui constituent l’environnement virtuel conçu sous RepastSimphony[NIC10].

- iii) Les stations dans l’environnement virtuel sont présentées dans notre modèle par : un contexte station (contient le type station) et une projection SIG pour localiser les stations (figure 5.3).

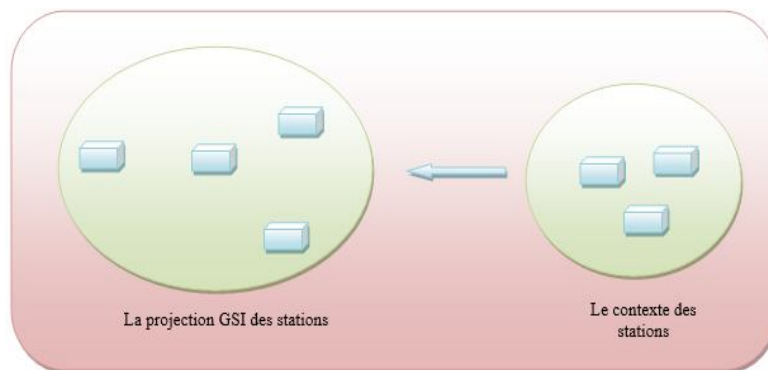


Figure.5.3 -La couche des stations qui constituent l’environnement virtuel conçu sous Repast Simphony [NIC10].

- iv) Les agents wayfinders qui présentent les piétons virtuels. Ils sont représentés sous Repast Simphony par une couche constituée (figure 5.4) : du contexte agent (qui représente le type agent) et une projection SIG pour la position des agents dans l’environnement.

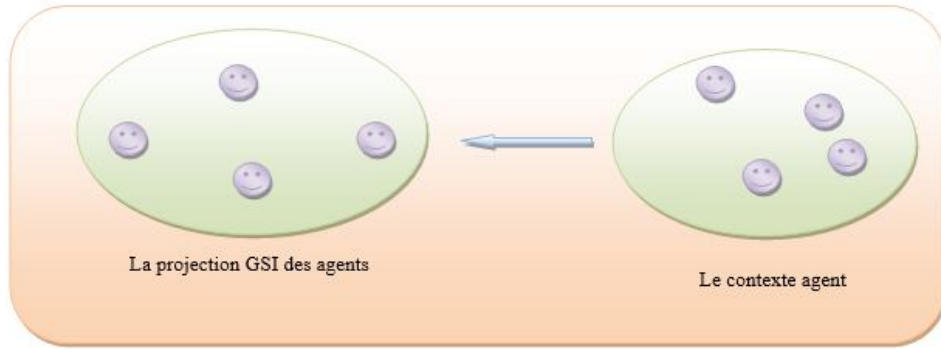


Figure.5.4. La couche des agents qui constitue l'environnement virtuel conçu sous Repast Symphony.

Dans les figures précédentes, cet environnement est conçu de quatre couches de base : couche pour représenter les routes, couche des stations, couche des intersections et couche des agents.

Chacune de ces couches a une relation avec les autres. Dans notre modèle, nous avons supposé qu'il n'y a pas d'interactions entre les agents du même contexte par ce que notre objectif dans cette étude est de représenter l'interaction entre les agents et l'environnement. Nous rappelons que dans notre cas les agents sont influencés par l'intégration locale des routes et leurs connectivités.

L'environnement virtuel sous Repast Symphony étant présenté, notre environnement de la simulation est un ensemble d'éléments qui sont en interactions entre eux.

La figure 5.5 résume les différentes étapes de processus de la simulation.

Par ailleurs, il est à noter que dans notre simulation, il n'y aura pas de communications entre agents : chaque agent s'exécute séparément et indépendamment de l'autre (pas d'interactions).

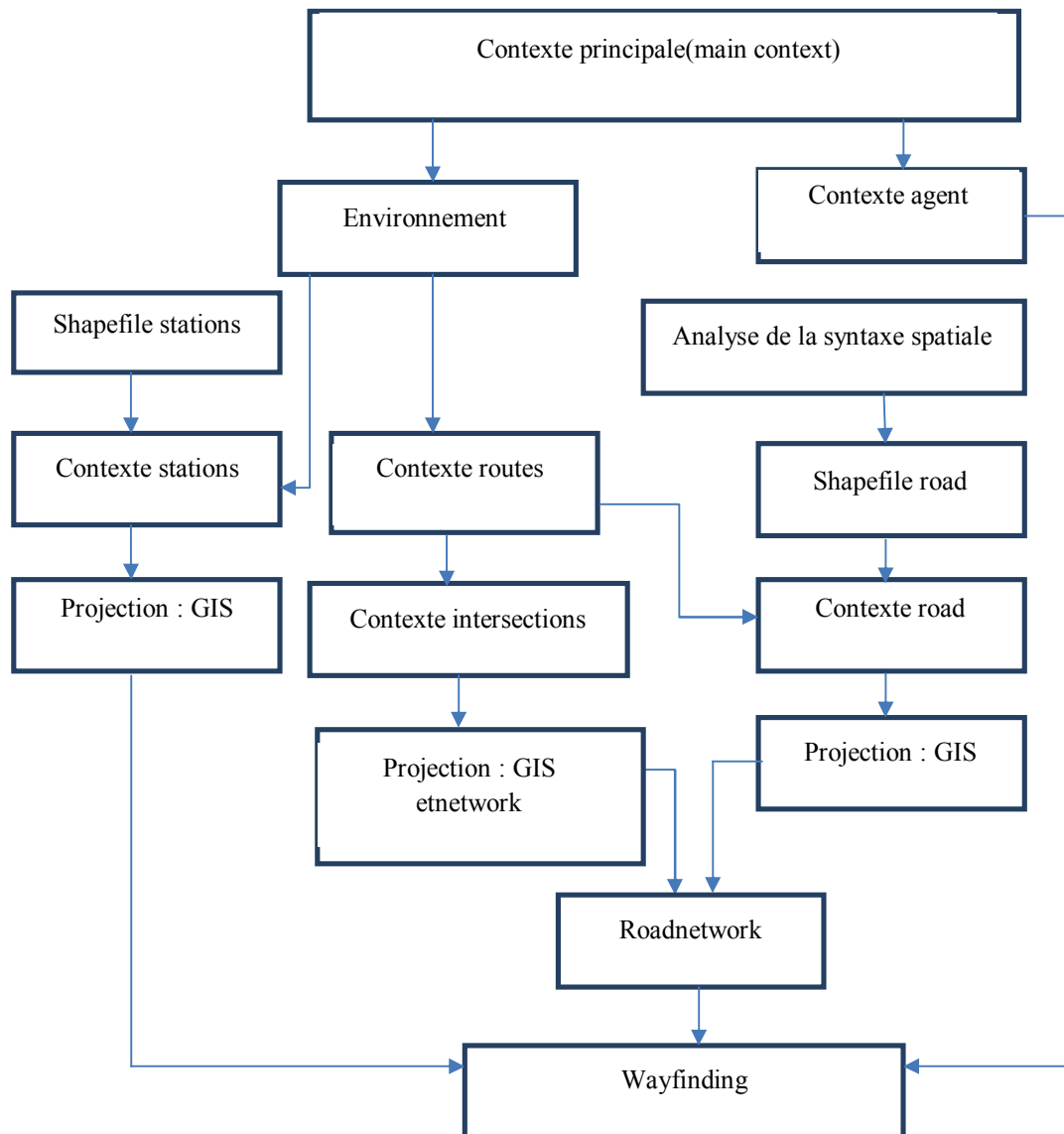


Figure.5.5 -Les étapes de la simulation

5.4. Wayfinding

Après la création de l'environnement qui est principalement une mise à jour de la ville virtuelle créée par [NIC08] dans sa thèse de doctorat, nous avons ajouté la couche station dans le modèle de Repast Symphony pour être des destinations pour nos agents.

La simulation de wayfinding est réalisée pour deux paramètres de la syntaxe spatiale.

5.4.1. Utilisation de l'intégration locale

Dans une première étape, nous avons simulé le processus de wayfinding par l'intégration locale des routes : au départ de la simulation, les agents n'ont aucune information sur le chemin qui amène à la destination comme mentionné précédemment et l'environnement étant non familier. Chaque agent a une information sur sa localisation actuelle et sur sa destination.

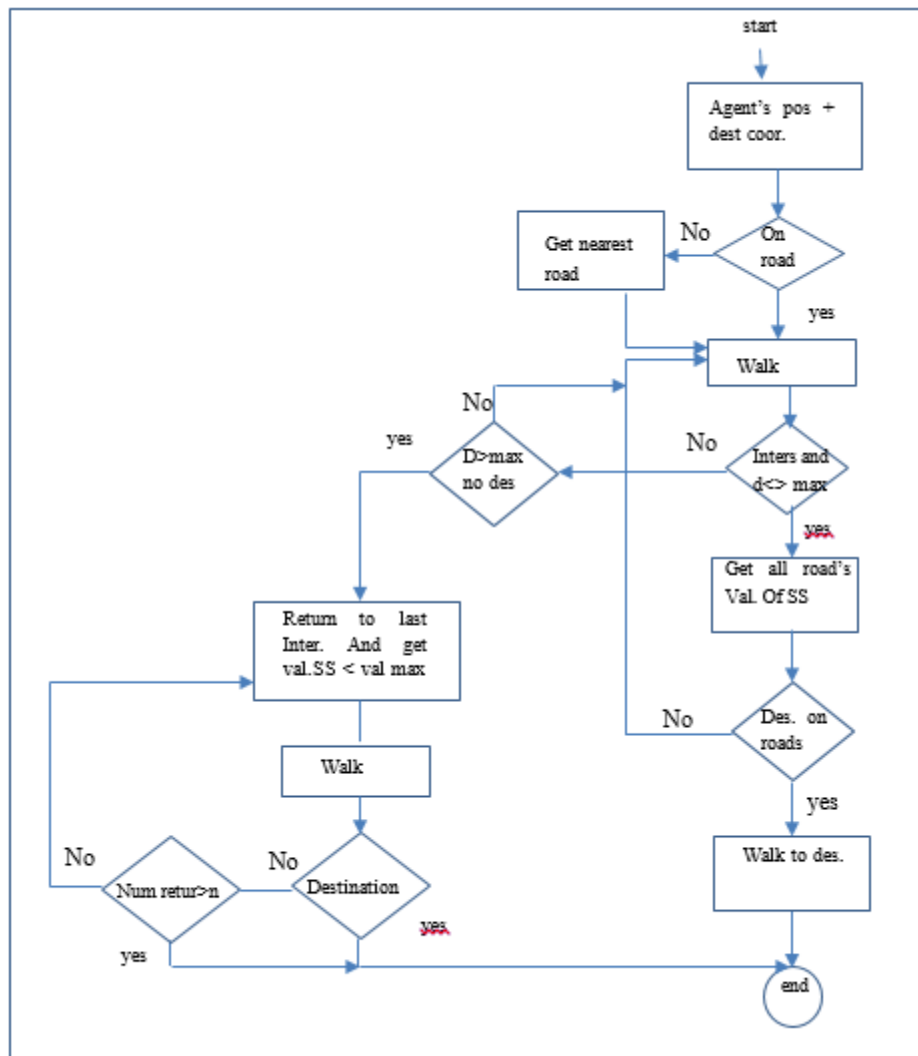


Figure.5.6 - Organigramme représente le processus de wayfinding.

Le Wayfinding selon la valeur d'intégration locale est explicité ci-après.

Le scénario possible pour chaque agent, suivant les valeurs de l'intégration locale, est le suivant :

- i) A $T=0$, chaque agent est dans sa position initiale et a comme informations : les coordonnées de la destination (chaque agent choisi une destination arbitraire) et les coordonnées de la route la plus proche de sa position initiale.

La figure suivant présente la position des agents dans la ville dans $T=0$.

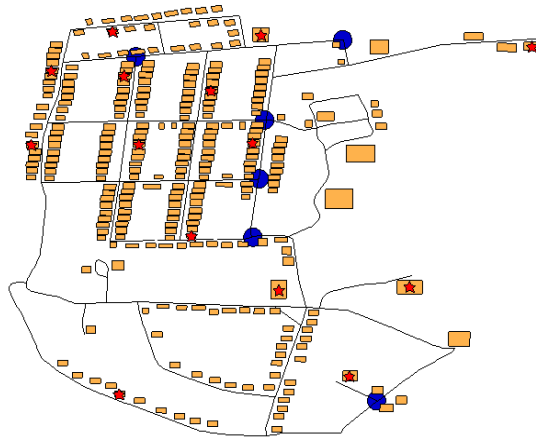


Figure.5.7 -La position de chaque agent au début de la simulation $T=0$.

- ii) A $T=dt$, chaque agent suit la procédure suivante :
 - a- Choix de l'intersection la plus proche sur sa position sur la route,
 - b- Consultation, à chaque intersection,d'une base de données qui contient les valeurs de l'intégration locale des routes qui sont connectés à cette intersection,
 - c- Calcul du nombre des nœuds traverser pendant le voyage.

Pour illustrer ces étapes, la figure suivante présente la position des agents à $T=dt$ où l'on remarque qu'après certaines itérations que les agents de la simulation sont concentrés au niveau des routes qui ont des valeurs de l'intégration locale élevées.

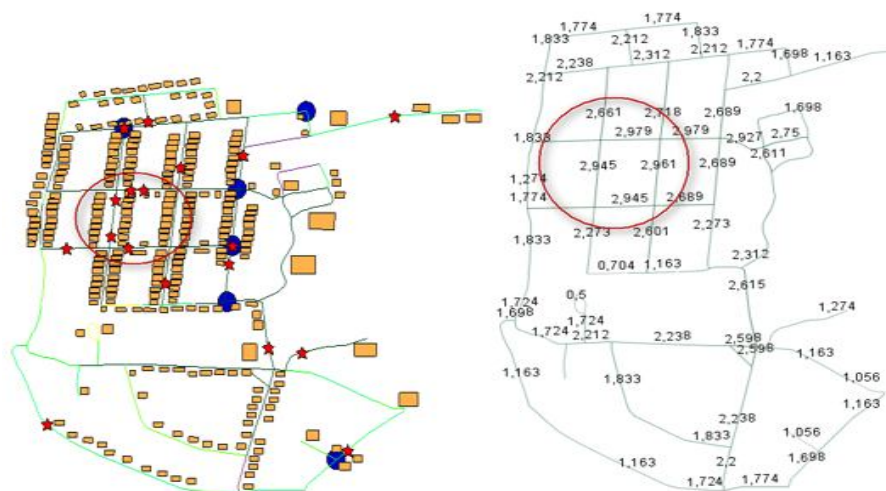


Figure.5.8 - La densité des routes dépend de leurs valeurs de l'intégration locale $T=dt$.

- d- Chaque agent s'oriente selon sa destination ; bien sûr on note que chaque agent a une idée sur sa destination mais le problème c'est comment atteindre la destination. La

figure suivante dans une image sur l'état des agents dans $T=2dt$ où les agents sont proches de leurs destinations.

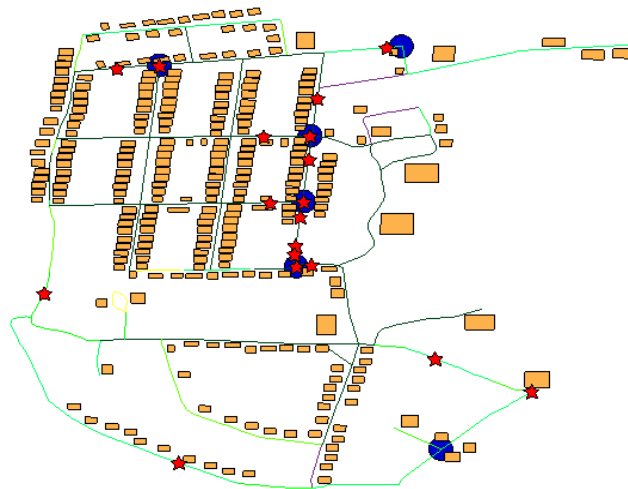
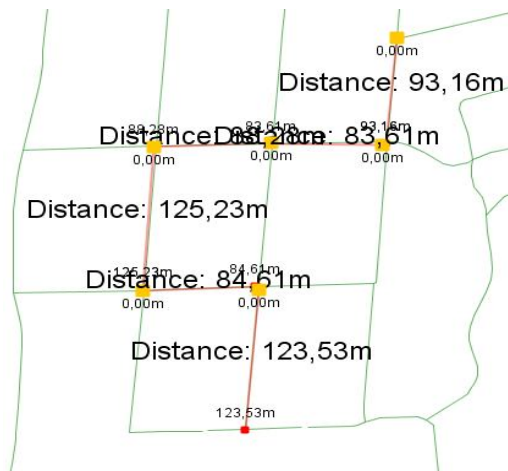


Figure.5.9 -La plus part des agents atteignent leurs destination $T=2dt$.

Les résultats de notre simulation selon le premier paramètre (intégration locale) montre (figure 5.10) le nombre de routes et la distance parcourus par le piéton selon notre exemple.



Nombre des segments	distance
6	598,42 m

Figure.5.10 –Résultats de simulation relatifs à l'intégration locale.

5.4.2. Utilisation de la connectivité

La deuxième étape de notre simulation s'est focalisée sur le processus de wayfinding par la connectivité où la figure 5.11 montre le nombre de routes et la distance parcourue par le piéton selon notre exemple.

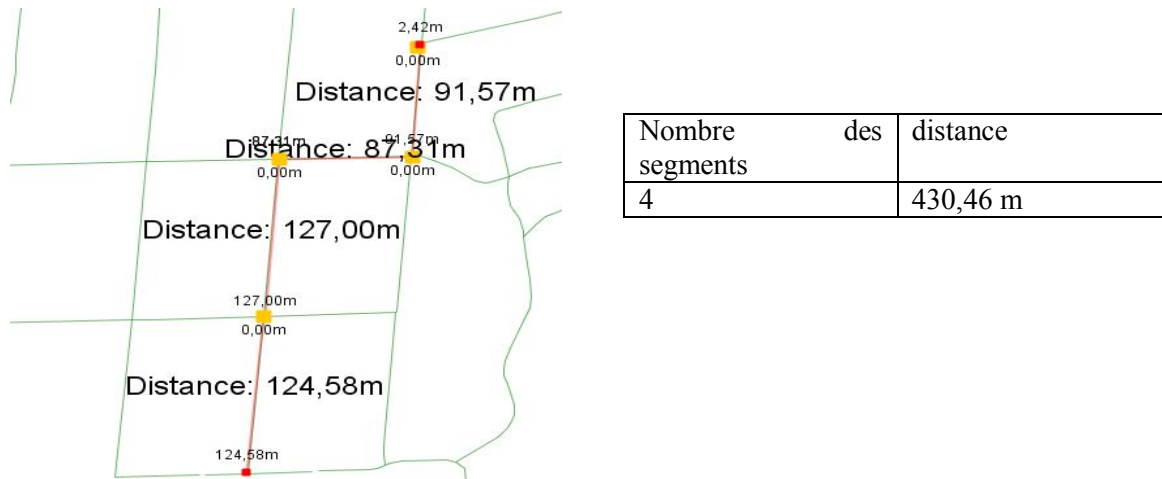


Figure.5.11 -Des mesures concernant la connectivité.

Un examen des résultats obtenus des deux simulations précédentes montre que les valeurs de l'intégration locale est trop sensible aux choix effectués par l'agent. Le nombre de routes et la distance parcourus sont, certes, différentes mais ces choix sont relatifs au piéton simulé. Autrement dit, ces routes peuvent être changées pour un autre piéton. Car, tout dépend d'un autre paramètre qui est la conscience dont son étude est en cours d'achèvement.


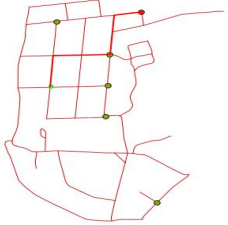
5.4.3. Comparaison de la tâche de wayfinding dans les deux cas

Dans le tableau ci-dessous on a calculé le temps pour aller d'une source A à une destination B on prenant des routes qui convient. Selon les valeurs de la connectivité et de l'intégration locale on a juste des premiers exemples sur le chemin dans les deux cas présentés dans le tableau ci-dessus.

On comparant les résultats préliminaire de notre travail, on constate que :

- ✓ La première des choses il y a une différence du temps dans les deux cas, où on remarque que le temps dans le cas de la connectivité est moins que le temps dans le cas de l'intégration locale.
- ✓ Une différence n'est pas grande dans l'itinéraire dans les deux cas où la différence existe au plus dans deux segments.
- ✓ Dans les deux exemples précédents, on remarque aussi la différence dans le nombre de segments et la distance parcourue.

- Tableau5.1 comparative entre les résultats de la connectivité et l'intégration locale.

<i>Le scénario</i>		<i>Le temps</i>	
<i>L'intégration locale</i>	<i>La connectivité</i>	<i>L'intégration locale</i>	<i>La connectivité</i>
		498.02	271.441
		371.142	198.669
		386.954	221.888
		209.886	110.776

D'une manière générale, les résultats de la simulation montrent la faisabilité du wayfinding dans un environnement non familier. Ces résultats ne sont pas figés pour les données utilisées par un piéton ; car, tout dépend de la cognition humaine.

En d'autres termes, le but de notre simulation est de donner une idée sur la route choisie par le piéton dans les deux cas.

Notons, par ailleurs une autre complexité du phénomène wayfinding dans un environnement non familier qui concerne les valeurs de l'intégration locale qui varient en fonction du temps. En effet, selon [SEI01] si le piéton passe par un chemin la valeur de l'intégration locale ne reste plus la même. Pour ce piéton il devient un peu familier et alors on passe à l'utilisation des valeurs globales dans le cas où il revient à utiliser ce chemin. Par contre, la connectivité reste la même puisque c'est une mesure locale.

5.5. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté un petit prototype et un scénario de déplacement d'un ensemble d'agents qui sont en train de chercher leurs chemins pour atteindre une destination spécifique. La recherche de chemin (ou wayfinding) est effectuée selon la structure de l'environnement urbain où nous avons proposé d'utiliser pour ces mesures de la syntaxe spatiale pour prédire les routes à utiliser par les piétons.

La simulation que nous avons réalisée s'est effectuée avec l'intégration locale comme paramètre principale qui guide et oriente les piétons. Le choix de ce paramètre se justifie par le fait qu'on a supposé que les piétons ne sont pas familiers avec l'environnement. Notre objectif est de savoir l'effet des paramètres retenus (intégration locale et connectivité) sur la recherche de chemin humain et quel est le paramètre le plus important par rapport à des préférences humaines.

Conclusion Générale et perspectives

Dans ce mémoire, nous avons proposé une modélisation pour le processus de wayfinding dans un environnement urbain non connu en utilisant la technique de la syntaxe spatiale.

Notre modèle est composé de trois éléments principaux : les piétons (agents), les routes et les intersections. Notre but est de modéliser le comportement de wayfinding des piétons dans un environnement urbain non familier avec l'utilisation des deux paramètres de la syntaxe spatiale (qui sont la connectivité et l'intégration locale) dans l'espoir de se rapprocher le plus possible d'un comportement de wayfinding humain. Pour ce faire, nous avons présenté dans le premier chapitre des rappels sur l'environnement urbain et ses principaux concepts selon [Lyn60]. Ensuite, dans le deuxième chapitre nous avons rappelés également les principaux concepts de la théorie de la syntaxe spatiale et ses paramètres que nous avons utilisés dans notre modèle. Quant au troisième chapitre, nous l'avons consacré à une revue bibliographique relative au processus de wayfinding où nous avons synthétisé les études empiriques effectuées par plusieurs chercheurs dans le domaine de l'architecture et l'urbanisme. Dans ce même chapitre, nous avons fait également un survol des modèles informatiques de wayfinding qui existent dans la littérature et à l'issue de ces rappels nous avons conclu que la plus part de ces modèles sont basés sur l'intelligence artificielle et la représentation mentale de l'environnement (c.-à-d. comment les configurations spatiales de l'environnement urbain sont représentées dans le cerveau humain). Sur la base de cette conclusion, nous avons procédé différemment avec notre modèle proposé (chapitres quatre et cinq). En effet, notre modèle est fondé sur les concepts et des notions de la syntaxe spatiale où des études empiriques effectuées par la syntaxe confirment plusieurs hypothèses sur la forte relation qui existe entre la syntaxe spatiale et le comportement de wayfinding humain. C'est sur cette base que nous avons attribué les valeurs des deux paramètres retenus à des routes d'une ville virtuelle réalisée par [NIC08] que nous avons retenue dans notre simulation. Ensuite, nous avons intégré ces paramètres de telle sorte que les agents choisissent la route selon les valeurs attribuées aux segments de routes. Notre but ici, c'est de savoir à quel niveau on peut compter sur ces paramètres dans le processus de wayfinding.

Nous avons donc élaboré un modèle qui reflète les résultats des travaux antérieurs tant théoriques que pratiques. Dans cet esprit de recherche scientifique, nous avons montré que notre travail est un peu différent de ceux déjà réalisés dans ce domaine dans le sens où il traite d'une façon générale l'effet des configurations spatiales sur les décisions humaines sans tenir compte de la manière de la représentation mentale de ces configurations.

Notre modèle présente une initiative prometteuse quant à l'usage de la syntaxe spatiale dans la modélisation informatique du processus de wayfinding dans un environnement non-familier.

Certes, notre modèle présente certaines insuffisances que nous souhaitons faire disparaître dans nos travaux futurs. C'est le cas par exemple de l'omission de certaines informations qui existent dans l'environnement ainsi que certains concepts tels que « awareness » qui n'est pas pris en considération dans notre modèle.

Consciente de ces insuffisances, notre modèle présente un grand avantage par rapport à des modèles de wayfinding réalisés précédemment. À notre connaissance, il n'existe pas de modèles informatiques de wayfinding qui modélisent l'effet des configurations spatiales sur le comportement des piétons. Tous les modèles existant traitent la façon de représenter des informations dans la mémoire humaine.

Une autre spécificité de notre modèle est qu'il prend ses racines du domaine des sciences cognitives, de l'urbanisme et de l'informatique. Conséquemment, nous ne pouvons parler de sa validité qui requiert une validation expérimentale pour pouvoir comparer le comportement de wayfinding des agents de notre simulation avec le comportement de wayfinding des êtres humains. La concrétisation de cette validation nécessite la création d'une carte cognitive :

- pour nos agents afin d'augmenter les connaissances des piétons progressivement et les utilisées en même temps pour avoir un comportement qui simule l'humain.
- permettant de faciliter le passage de l'utilisation des paramètres locaux de la syntaxe spatiale à des paramètres globaux.

Enfin, une dernière suggestion de perfectionnement de notre modèle concerne son amélioration surtout dans sa partie sémantique.

Pour mettre un terme provisoire à notre travail, nous sommes convaincues que le travail réalisé n'est qu'à son début et que la suite s'annonce passionnante.

Références bibliographiques

- [ALA05] T. Alasdair, A. Penn, B. Hillier, “*An algorithmic definition of the axial map*”, Environment and Planning B: Planning and Design, vol. 32, pages 425-444, 2005.
- [ALI99] L. Alien, “*Spatial abilities, cognitive maps, and wayfinding: Bases for individual differences in spatial cognition and behavior*”. In R.G. Golledge (Ed.) Wayfinding behavior: “*Cognitive mapping and other spatial processes*”. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, pp. 46-80, 1999.
- [ARM11] U. Armel, W. Kemloh, S. Armin, H. Stefan, “*Modelling dynamic route choice of pedestrians to assess the criticality of building evacuation*”, fety Science Journal, March 22, 2011.
- [ART92] P. Arthur, R. Passini, “*Wayfinding: People, Signs, and Architecture*”, Ontario: McGraw-Hill Ryerson Ltd. Original reissued as a collector’s edition in 2002 by Focus Strategic Communications, 1992.
- [BEA12] E. Beatrix, “*wayfinding and spatial configuration: evidence from street corners*”, Proceedings: Eighth International Space Syntax Symposium, Edited by M. Green, J. Reyes and A. Castro. Santiago de Chile: PUC, 2012
- [BON01] E. Bonabeau “*Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems*”. Proc Natl Acad Sci 99(3):7280–7287, 2001.
- [BRA80] i. P. Braaksrna, & W. I. Cook, “*Human Orientation in Transportation Terminals*”, Transportation Engineering Journal, 1980.
- [CAO08] H. Cao, S. Jun, L. Junling, “*Modelling and Simulation Wayfinding in Unfamiliar Campus Environment*”, Natural Computation, ICNC '08, Vol. 6, PP. 48 - 53 , 2008.
- [CAR02] J.R. Carpman, G. Janet and G. Myron, “*Wayfinding: A Broad View*,” pp. 427-442. In Bechtel and Churchman, eds., *Handbook of Environmental Psychology*, New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [CAR03] J.R. Carpman, G. Janet and G. Myron, “*Design that cares*”, 3rd edition, Chicago: American Hospital Publishing, 2003.
- [CHI06] C. Chiung-Hui, “*A Prototype Using Multi-Agent Based Simulation in Spatial Analysis and Planning*”, Research report, Department of Digital Media Design, Asia University, Taiwan, 2006.

- [CHO95] E. Chown, S. Kaplan, D. Kortenkamp, “*Prototypes, location, and associative networks (PLAN): Towards a unified theory of cognitive mapping*”, *Cognitive Science*, vol. 19 , pp. 1-51, 1995.
- [DAA12] N. Daas, «*Etude Morphologique des Agglomerations Vernaculaires Auressiennes*», Mémoire de magister, université de Batna, 2012.
- [DIJ11] J. Dijkstra, J.Jessurun, H.Timmermans& B. de Vries, “*A framework for processing agent-based pedestrian activity simulations in shopping environments*”, *Cybernetics and Systems: An International Journal*, 42:526–545, 2011.
- [DOW77] R. Downs and D.Stea, “*Maps in Minds*”, New York: Harper and Row 1977.
- [DOW73] R. Downs and D. Stea, “*Image and the Environment*”, Chicago: Aldine, 1973.
- [FAR12] A. C. Farr, T. Kleinschmidt, P. K.Yarlagadda & K. Mengersen, “*Wayfinding : a simple concept, a complex process*”, *Transport Reviews*, In press, 2012.
- [GAR84] T.Garting, A. Book, &E. Lindberg,“*Cognitive Mapping of Large- Scale Environments: The Interrelationship of Action Plans, Acquisition and Orientation*”, *Environment and Behavior*. 16 (1) 3-34, 1984.
- [GAR86] T. Garling, A. Book, &E. Lindberg, “*Spatial orientation and wayfinding in the designed environment: A conceptual analysis and some suggestions for post-occupancy evaluation*”, *Journal of Architectural & Planning Research*55-64, Feb 1986, Vol. 3(1), 55-64, 1986.
- [GIB79] J. J. Gibson, “*The Ecological Approach to Visual Perception*”, Cornell University, 1979.
- [GLU91] M. Gluck, “*Making Sense of Human Wayfinding; review of Cognitive and Linguistic Knowledge for Personal Navigation with a New Research Direction*”, 1991.
- [GOL99] R.G.Golledge, “*Wayfinding Behavior: Cognitive Mapping and Other Spatial Processes*”, Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1999.
- [GOP95] S.Gopal, R.klatzky, &T. P. Smith, “*Navigator: a psychologically based model of environmental learning through navigation*”. In T. Garting (Ed.), *Readings in Environmental Psychology: Urban Cognitive*.:AcademyPress Limited, 1995.
- [HED14] A. Hedhoud,F. Cherif, A. Bougtitiche “*Wayfinding in unfamiliar environment based on space syntax*”, *The First International Symposium on Informatics and its ApplicationsISIA’2014*, University of M’sila, Algeria, on February 25-26, 2014.

- [HED13] A. Hedhoud, F. Cherif, A. Bougtitiche, “*Pedestrian Modeling Based on Space Syntax Approach*”, The First Workshop Images, Graphiques et Vie Artificielle IGVA’13, Université Biskra, Algerie, 16-18 Juin 2013.
- [HEF83] H. Heft, “*Way-finding as the perception of information over time*”. *Popular & Environment: Behavioral & Social Issues*. 6(3), PP.133-150, 1983.
- [HIL93] B. Hillier, A. Penn, J. Hanson, T. Ggrajewski, J. Xu, “*Natural movement*” in *Environment and Planning B*, Vol. 20, pp. 29–66 , 1993.
- [JEN00] N. R. Jennings, “*On agent-based software engineering*”. *Artificial Intelligence Journal* vol.117: 277–296, 2000.
- [KLA93] B. Klarqvist, “*A Space Syntax Glossary*”, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1993.
- [KUI78] B. Kuipers, “*Modeling Spatial Knowledge*”, *Cognitive Science*, vol. 21, pp. 129-154, 1978.
- [LEI89] D. Leiser, Zilbershatz, “*The Travelten A Computational Model of Spatial Network Learning*”, *Environment and Behavior*. Vol. 21, pp. 435-463, 1989.
- [LYN60] K. Lynch, “*The Image of the City*”, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1960.
- [MAC10] C. M. Macal, M. J. North, “*Tutorial on agent-based modelling and simulation*”, *Journal of Simulation*, vol. 4, pp.151–162, 2010.
- [MAK12] T. Makoto, T. Ishikawa, “*Computationally determining the salience of decision points for real-time wayfinding support*”, *Journal of Spatial Information Science* Number 4 (2012), pp. 57–83.
- [MCD84] D. McDermott, E. Davis, “*Planning Routes through Uncertain Territory*”, *Artificial Intelligence*, vol. 22 , pp. 107-156, 1984.
- [MCD10] M. D. McDaniel , “*Agent-Based Modeling of Lost Person Wayfinding*”, Master theses, University of California, March 2010.
- [MIC91a] M. O’Neill., “*Effects of signage and floor plan configuration on wayfinding accuracy*”, *Environment & Behavior*. Vol. 23, PP. 553-514, 1991.
- [MIC91b] M. O’Neill., “*Evaluation of a conceptual model of architectural Legibility*”. *Environment & Behavior*. Vol. 23, PP. 259-284, May 23, 1991.
- [MON98] D. R. Montello, “*A New Framework for Understanding the Acquisition of Spatial Knowledge in Large Scale Environments*”, M. Egenhofer and R. G. Golledge ed. *Spatial and Temporal Reasoning in Geographic Information Systems*. Oxford University Press, New York and Oxford, 1998.

- [MON98] D. R. Montello, “*The contribution of space syntax to a comprehensive theory of environmental psychology*”, Proceedings, 6th International Space Syntax Symposium, İstanbul, 2007.
- [NIC10] M. Nick, “*Agent-Based Modelling of Burglary*”, Ph. D thesis, The University of Leeds, School of Geography, January 2010.
- [NIC08] M. Nick, « *Repast Symphony Tutorial* », <http://repast.sourceforge.net>, 2008.
- [NIC12] M. Nick, M. Birkin, “*Analysis of crime patterns through the integration of an agent-based model and a population microsimulation*”, Computers, Environment and Urban Systems, Volume 36, Issue 6, November 2012, Pages 551–561.
- [ORE12] N. Orellana, “*On Spatial Wayfinding: agent and human navigation patterns in virtual and real worlds*”, Master thesis, Bartlett school of Graduate Studies, University College London, 2012.
- [OZB07] A. Ozbil, J. Peponis, “*Modeling Street Connectivity and Pedestrian Movement According to Standard GIS Street Network Representations*”, 6th International Space Syntax Symposium, İstanbul, 2007.
- [PAR07] S. Paris, “*Caractérisation des niveaux de services et modélisation des circulations de personnes dans les lieux d’échanges*”, thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 2007.
- [PAS84] R. Passini, “*Wayfinding in Architecture*”, New York: Van Nostrand Reinhold, 1984.
- [PEP90] J. Peponis, C. Zimring, and Y.K. Choi, “*Finding the Building in Wayfinding*”, Environment and Behavior, V. 22(5): 555-590, 1990.
- [PIA67] J. Piaget, B. Inhelder, “*Perceptual Space, Representational Space, and the Haptic Perception of Space, The child’s conception of space*”, 1967.
- [POU11] R. Poulain, « *Simulation multi-agent d’une population artificielle de learners et de copiers* », haute école d’ingénierie et de gestion du canton de vaud, 2011.
- [RAU97] M. Raubal, “*structuring wayfinding tasks with image schemata*”, Master thesis, University of Maine, December 1997.
- [ROM05] T. Romain, “*Modèle de mémoire et de carte cognitives spatiales : application à la navigation du piéton en environnement urbain*”, université de Rennes 1, Thèse de Doctorat, 2005.
- [RUI10] L. Rui, A. Klippel, “*Using Space Syntax To Understand Knowledge Acquisition And Wayfinding In Indoor Environments*”, Ninth IEEE Int. Conf. on Cognitive Informatics (ICCI’10), 2010.

- [SEI99] H. Seif, “*Expectation of Exploration: Evaluating the Effects of Environmental Variables on Wayfinding*”. In *The Power of Imagination*. pp. 84-94, Orlando, Florida, 1999.
- [SEI01] H. Seif, “*Complex architecture: An investigation of spatial and cognitive variables through wayfinding behavior*”, Ph. D. thesis, Georgia institute of technologie, 2001.
- [SEI03a] H. Seif, C. Zimring, “*Just Down the Road A Piece: The Development of Topological Knowledge of Building Layouts*”, *Environment and Behavior*, V. 35(1): 132-160, 2003.
- [SEI03b] H. Seif, and S. Giroto, “*Ability and intelligibility: Wayfinding and environmental cognition in the designed environment*”, *Proceedings*, fourth International Space Syntax Symposium, London, 2003.
- [SIE75] A. W. Siegel, S. H. White, “*The Development of Spatial Representations of Large-Scale Environments*”. *Advances in Child Development and Behavior*. 10:9-55, 1975.
- [TAM09] M. Tamás, “*Strategies of Human Spatial Cognition: Cognitive and Behavioural Trade-offs*”, PhD Thesis, University Of Southampton, January 2009.
- [WAN12] M. Wang, “*Extending geographic information systems to urban morphological analysis with a space syntax approach*”, Master thesis, faculty of engineering and sustainable development, June 2012.
- [WEI79] G.D. Weisrnan, “*Way-finding in the built environment : a study in architectural legibility*”, Unpublished Doctoral Dissertation, University of Michigan, 1979.
- [WIL92] D. B. Willham, “*The topological properties of wayfinding in architecture.*” Unpublished Master’s Thesis. College of Architecture, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1992.
- [XIA13] X. Xiaolin, “*Geomatics A Comparison Study on a Set of Space Syntax based Methods Applying metric, topological and angular analysis to natural streets, axial lines and axial segments* », Master theses, 2013.
- [YOO11] U. Yoo, H. Yeol Choi, J. Oh, “*Analysis on City Tour Routes in relation to Urban Spatial Structure and pedestrian Movement*”, *Mémoire de Master*, 2011.
- [ZAC06] V. Zachariadis, “*An Agent-Based Approach To The Simulation Of Pedestrian Movement And Factors That Control It*”, Bartlett School of Planning, UCL, England, 2006.