



**INSTITUT FRANCOPHONE INTERNATIONAL**

**TRAVAIL PERSONNEL ENCADRE (TPE)**

---

**Modéliser et simuler l'évacuation  
d'incendie dans de grands bâtiments  
publics**

---

***RAPPORT FINAL***

**PROMOTION 23**  
ANNÉE ACADÉMIQUE 2018-2019

**ENSEIGNANT :**  
Ho TUONG VINH

**RÉDIGÉ PAR :**  
Koffi Agbeka YEKPLE-DJILAN

# Table des matières

<b>INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>1 Contexte de l'étude</b>	<b>3</b>
<b>2 Étude préalable</b>	<b>4</b>
2.1 Concepts clés . . . . .	4
2.1.1 Agent . . . . .	4
2.1.2 Modèle d'agent . . . . .	4
2.1.3 Simulation . . . . .	4
2.1.4 Modélisation . . . . .	4
2.1.5 SIG . . . . .	4
2.1.6 Incendie : . . . . .	5
<b>3 État de l'art :</b>	<b>5</b>
3.1 Foule : . . . . .	5
3.2 Typologie de la foule . . . . .	5
3.2.1 Classification de la foule . . . . .	5
3.2.2 Les mouvements de foule . . . . .	7
<b>4 Approches de l'étude</b>	<b>8</b>
4.1 Approche Macroscopique : . . . . .	8
4.2 Approche microscopique : . . . . .	8
4.3 Approche Hybride . . . . .	8
4.4 Résumé des différents travaux des travaux connexes . . . . .	8
<b>5 Exemple de modèle et d'applications d'évacuation</b>	<b>11</b>
5.1 Synthèse des modèles . . . . .	11
5.2 Simulex . . . . .	13
5.3 Jeu de données Système d'Informations Géographiques 3D SIG . . . . .	14
5.4 Simulation de l'évacuation d'un bâtiment . . . . .	14
<b>6 Proposition de solution</b>	<b>15</b>
6.1 Résumé de la Solution . . . . .	15
6.2 Justication du choix . . . . .	15
6.3 Méthodologie de la recherche . . . . .	15
6.4 Modèle proposé . . . . .	16
6.4.1 Particularité de notre modèle . . . . .	16
6.5 Choix des outils de travail . . . . .	17
6.6 Contour de la solution : Immeuble objet de notre modélisation . . . . .	17

<b>7</b>	<b>Expérimentation et et analyse des résultats</b>	<b>19</b>
	<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>26</b>

## Table des figures

1	tableau SWOT des modèles d'évacuation . . . . .	9
2	tableau SWOT des modèles d'évacuation . . . . .	10
3	Tableau des caractéristiques des modèles . . . . .	11
4	tableau des caractéristiques des modèles . . . . .	12
5	Tableau comparatif des modèles d'évacuation . . . . .	13
6	Méthodologie de la recherche . . . . .	15
7	Méthodologie de la recherche . . . . .	16
8	Outils utilisés . . . . .	17
9	Vue de face de la cité à modéliser avec l'entrée principale . . . . .	17
10	Vue de face de la cité à modéliser . . . . .	18
11	Tracé du plan sur QGIS . . . . .	18
12	Visualisation 3D de l'immeuble montrant l'ossature des chambres et des sorties obtenue avec QGIS et Arcscene . . . . .	19
13	Tableau de répartition des agents aux différents étages . . . . .	20
14	Visualisation 3D de l'immeuble montrant l'ossature des chambres et les occupants . . . . .	20
15	Diagramme initial de répartition des agents aux différents étages . . . . .	21
16	Courbe initiale de répartition des agents aux différents étages . . . . .	21
17	Diagramme intermédiaire de répartition des agents aux différents étages . . . . .	22
18	Courbe intermédiaire de répartition des agents aux différents étages . . . . .	22
19	Diagramme finale de répartition des agents aux différents étages . . . . .	23
20	Courbe finale de répartition des agents aux différents étages . . . . .	23
21	Visualisation 3D de l'immeuble montrant l'ossature des chambres et les occupants . . . . .	24

# INTRODUCTION

La simulation d'évacuation de bâtiment en feu présente la particularité de se fonder sur un mécanisme impossible à prédire : le comportement de ses occupants.

Cependant, depuis le début des années 1970, de nombreux modèles d'évacuation de personnes basés sur diverses approches ont vu le jour. Ces modèles ont pour but de prédire le déroulement du processus d'évacuation par rapport à un scénario donné, et en particulier le temps nécessaire pour l'évacuation d'un bâtiment.

Les premières tentatives de modélisation en évacuation se fondaient sur des formulations empiriques liant la vitesse de déplacement d'un groupe d'individus à la densité de personnes (modèles de Togawa [1], de Pauls [2]). Les progrès de la simulation numérique et les études menées sur le comportement humain ont ensuite permis d'envisager une représentation discrète des individus, dans laquelle chaque personne est considérée comme une entité individuelle dont le mouvement est régi par des lois plus ou moins complexes. Le modèle SEBES a pour sa part pris en compte, le feu, la fumée, les alertes, les plans d'évacuation et les évacués.

Ce travail pratique encadré arrive à point nommé pour proposer un modèle de simulation du comportement humain face aux situations d'urgence telles que les incendies de bâtiment public. Notre travail traitera précisément de la simulation de l'évacuation d'une résidence universitaire avec plusieurs niveaux.

## 1 Contexte de l'étude

Le contexte de transition et de décollage économique couplé à un fort taux démographique que connaît Hanoï (ville du Vietnam) depuis la fin des années 1990 avec de vastes ensembles multifonctionnels appelés «nouvelles zones urbaines» (ou khu do thi moi, ci-après KDTM) qui sont apparus sur les franges de la métropole (Fanchette, 2015) conduisent à l'étalement horizontal et vertical de la ville.

La multiplicité des immeubles d'habitation et ou de bureau, de grandes tailles, résultante de l'étalement vertical urbain sous-tend la définition et la mise en place de plan et procédure d'évacuation devant permettre aux personnes vivant dans ces immeubles de libérer rapidement les lieux en cas de sinistre, car on se souvient encore de l'incendie qui s'est déclenché à Jecheon en Corée du sud et qui a fait au moins 29 morts le jeudi 21 décembre 2017.

Le présent travail permettra in fine, la modélisation et la simulation de l'évacuation d'un immeuble en cas de sinistre. Il pourrait être adapté aux autres immeubles en prenant en compte les spécificités de ces derniers.

## 2 Étude préalable

Pour réaliser notre projet, il est impératif de faire un récapitulatif des aspects technologiques et concepts clés autour desquels s'articule notre sujet. Et pour se faire, nous présentons dans cette partie, une étude théorique des concepts du domaine de travail et une étude comparative des solutions existantes dans le marché.

### 2.1 Concepts clés

#### 2.1.1 Agent

Un agent est un système informatique situé dans un environnement et capable d'actions autonomes dans cet environnement afin d'atteindre ses objectifs (Wooldridge Jennings 95 – US)

#### 2.1.2 Modèle d'agent

La relation d'un agent réactif à son environnement est un couplage par stimulus/réaction, proche du couplage par entrée/sortie tel qu'il est défini par [Deffuant 1992]. Dans ce cadre, la perception dénote le fait pour l'agent de ne considérer que certains éléments constitutifs de son environnement, qui seront les entrées ou les stimulus, auxquels correspondront des réactions sous la forme d'actions. Le comportement des agents réactifs est donc basé sur le principe de l'action comme réaction à un stimulus.

#### 2.1.3 Simulation

On nomme simulation la démarche scientifique qui consiste à réaliser une reproduction artificielle, appelée modèle, d'un phénomène réel que l'on désire étudier, à observer le comportement de cette reproduction lorsqu'on en fait varier certains paramètres, et à en induire ce qui se passerait dans la réalité sous l'influence de variations analogues.

La démarche de simulation passe donc par trois étapes distinctes : l'étape de modélisation, qui consiste à construire le modèle du phénomène à étudier, l'étape d'expérimentation, qui consiste à soumettre ce modèle à un certain type de variations, et l'étape de validation, qui consiste à confronter les données expérimentales obtenues avec le modèle à la réalité.

#### 2.1.4 Modélisation

La modélisation est une opération par laquelle on établit le modèle d'un système complexe, afin de l'étudier plus commodément et de mesurer les effets sur ce système des variations de tel ou tel de ses éléments composants (Giraud-Pamart Nouv. 1974).

#### 2.1.5 SIG

Un Système d'Information Géographique (SIG) est un système d'informations conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques. L'acronyme "SIG" est parfois utilisé pour définir les « sciences de l'information géographiques » ou « études sur l'information géo-spatiales ». Cela se réfère aux carrières ou aux métiers qui impliquent l'usage de systèmes d'information géographique et, dans une plus large mesure, qui concernent les disciplines de la géo-informatique (ou géomatique).

### **2.1.6 Incendie :**

Un incendie est une réaction de combustion non maîtrisée dans l'espace et dans le temps. C'est un feu qui peut être violent et destructeur pour les activités humaines et la nature.

Sans intervention extérieure, un incendie se développe et se propage très rapidement.

## **3 État de l'art :**

L'état de l'art est l'état des connaissances dans tout domaine donné (scientifique, technique, artistique, médical, etc.) à un instant donné. En d'autres termes, cette étape consiste à rechercher toutes les informations, publications formelles ou informelles, découvertes, nouveautés et inventions sur toutes les dernières avancées scientifiques dans le domaine. Les travaux traitant de cette problématique foisonnent. cependant, nous avons orientés nos recherches autour de trois approches que nous trouvons pertinents et par dessus tout édifiant.

L'objectif de ce travail est La simulation et la modélisation d'une foule en cas de crise et pour ce faire, il est important de cerner le comportement et la composition d'une foule pour mieux comprendre le concept et implémenter un modèle approprié pour le cas d'étude choisi.

### **3.1 Foule :**

Une foule est définie comme un groupe d'individu se regroupant dans une espace donnée ou une multitude de personnes réunies en un même lieu. Cependant Si une foule est une agglomération d'individus en interaction, il est important dans le cadre de notre travail de distinguer une foule physique d'une foule psychologique.

La notion de foule physique se confond avec la notion de groupe, les individus partageant simplement une localisation. Par contre, dans une foule psychologique les individus partagent non seulement un même lieu mais aussi une forme d'unité mentale formant de ce fait une entité sociale propre. Une foule physique de piétons dans un croisement.

(1) Les individus partagent un même lieu mais chacun a un objectif de déplacement différent.

(2) Une foule d'individus dans un stade assistant à un match.

Ils partagent un même lieu et un même objectif, ils forment alors une foule psychologique.

### **3.2 Typologie de la foule**

La diversité des foules réside dans la diversité des individus qui la composent, dans l'identité sociale qui les réunis et dans les comportements qui émergent de celle-ci. Il est important de prendre en compte cette disparité an de mieux gérer les événements particuliers selon les caractéristiques de la foule. Cependant, peu de travaux dans la littérature ont été consacrés à l'étude de la typologie des foules. En 1967, Momboisse [momboisse 1967] classe les foules en quatre types distincts : foule en fuite, foule avide, foule expressive et foule agressive. En 1995, Berlonghi élargit cette typologie et propose onze types de foule selon la nature de l'évènement réunissant ses membres que nous répartissons dans deux grandes classes suivant l'état et/ou la constitution de la foule.

#### **3.2.1 Classification de la foule**

Les critères de classification d'une foule sont les suivantes :

Compte tenu de l'état de la foule, nous avons :

- Une foule en difficulté ou à mouvements limités : foule dont les mouvements sont restreints par manque d'espace libre par exemple. Le manque de mobilité peut demander une certaine planification préalable.
- Une foule expressive ou épanouie : foule impliquée dans un relâchement émotionnel tel qu'une célébration, des chants ou des danses.
- Une foule hostile : foule verbalement ou physiquement agressive. Ce type de foule est dangereux et susceptible de commettre des infractions.
- Une foule en fuite : foule qui fuit un danger réel ou imaginaire. Ce type de foule est redouté dans les catastrophes car leurs comportements imprévisibles et incontrôlables amplient souvent l'ampleur des catastrophes.
- Une foule dense ou étouffante : foule très dense, où les individus perdent leurs facilités de déplacements et se trouvent emprisonnés dans la foule.
- Une foule pressée : foule dont le but est d'obtenir, d'acquérir ou de voler quelque chose. Ce type de foule inclut les foules de photographes ou des foules de voleurs, et cause généralement de dégâts humains et matériels considérables.
- Une foule violente : foule qui attaque et terrorise sans aucun respect des autres

#### Compte tenu de sa constitution

- Une foule de piétons : foule en déplacement d'un endroit donné à un autre dans le but d'utiliser certaines facilités.
- Une foule de spectateurs : foule décentralisée qui réunit un ensemble d'individus hétérogènes pour observer un événement particulier.
- Une foule de participants : foule impliquée dans des activités liées à un événement particulier.
- Une foule de manifestants : foule hiérarchisée contrôlée par un leader et organisée pour un événement spécifique.

Selon Berlonghi, chaque événement rassemble des individus avec des convictions et des objectifs divers, ce qui les amène par conséquent à se comporter différemment devant une même perturbation. En situation de crise, par exemple, une foule de spectateurs se comporte de façon moins agressive qu'une foule violente. En effet, cette dernière est formée en ayant pour but de terroriser et d'attaquer un lieu, la crise ne fait que rajouter de la violence dans les comportements de ses individus, ce qui se répercute par la suite dans le comportement global de la foule.

Les deux classifications ainsi présentées se limitent à un seul critère de Classification réduisant ainsi la définition d'une foule à seulement une dimension : son objectif. Or les études en science sociale et en psychologie nous montrent que de nombreux paramètres influencent l'évolution des foules telles que la nature et le degré d'interaction entre les individus, la nature et la durée de la perturbation et la localisation de la foule. Classer la foule sur le seul critère de « l'objectif » réduit la diversité des foules et fausse toute tentative de prédiction de ses mouvements.

La diversité des foules réside en particulier dans les nombreux éléments qui la constituent et dans le degré de dominance entre les individus les uns par rapport aux autres. Il est important dans ce cadre de tenir compte de tous ces éléments, et de proposer une typologie basée sur plusieurs dimensions. Dans cette optique de généralisation des critères de Classification de la foule, le cabinet officiel du gouvernement Britannique [2] propose une typologie basée sur dix critères d'évaluation et de leurs degrés d'importance dans le comportement global exhibé.

Les dix critères sont les suivants :

1. L'objectif de la foule ;
2. La durée d'existence de la foule ;

3. Le temps de départ de l'évènement ;
4. La localisation des individus lors de l'évènement ;
5. L'environnement général de l'évènement et le degré des conflits ;
6. Le degré d'identification de l'individu à la foule ;
7. Le degré d'interaction entre les membres ;
8. Le degré d'hétérogénéité dans la foule ;
9. La taille de la foule ;
10. Le nombre de bagages emporté par chaque individu.

En se fondant sur le degré d'importance de ces diverses caractéristiques, cette typologie assure une meilleure identification de la nature et de la structure de la foule. Elle forme de ce fait une bonne base d'information pour les décideurs afin de mieux prévenir et anticiper les événements qui peuvent se produire.

### **3.2.2 Les mouvements de foule**

Au premier abord, les mouvements de foules se prêtent assez peu à la démarche de modélisation mathématique. Les tendances peuvent être très variables d'un individu à l'autre, le comportement d'un individu donné est lui-même peu prévisible, et le grand nombre d'individus potentiellement en interaction rend difficile une formalisation rigoureuse de ces phénomènes. Le plan de modélisation des comportements individuels associé à une prise en compte appropriée des interactions entre individus permet pourtant de reproduire certains phénomènes non triviaux observés en pratique.



## 4 Approches de l'étude

Dans le mouvement d'évacuation de foule, il y a 3 approches à considérer pour l'étude du comportement des agents considérés :

### 4.1 Approche Macroscopique :

Cette méthode prend en compte le comportement des d'individus à se regrouper lors d'une évacuation issue de situations de panique. On observe une sorte de regroupement selon les une appartenance respective des groupes formés pour évacuer.

### 4.2 Approche microscopique :

Si l'étude macroscopique prend en considération les groupes d'individus, cette approche fait référence lui à une entité de la foule bien assez important, l'individu lui-même. Il étudie tout ce qui est en rapport avec le comportement de chaque individu constituant une foule.

### 4.3 Approche Hybride

A ce niveau, le concept est un mélange du Macroscopique tant que du Microscopique, C'est-à-dire dans l'approche Hybride, l'étude est tout aussi bien important sur chaque individu autant que les groupes apte à se former lors d'une évacuation.

### 4.4 Résumé des différents travaux des travaux connexes

Les différentes approches ont déjà fait l'objet d'étude :

- Approche par recherche opérationnelle (RO);
- Approche par automate cellulaire;
- Approche par avis des experts (SEBES).
- Approche par analyse de graphe;
- Approche par séquençage vidéo;
- Approche par modèle dynamique (ESM);
- Approche SIG.

les tableaux ci-dessous contiennent la synthèse des différentes approches sus-énumérées

Designation de l'approche	Description	Avantages	Limites
Approche par recherche opérationnelle (RO)	Le travail combine l'utilisation du modèle d'évacuation avec des techniques numériques utilisées dans le domaine de la recherche opérationnelle, telles que Design of Experiments (DoE), les Modèles de Surface de Réponse (RSM) et les techniques d'optimisation numérique [Tavares 2009]	Recherche de la sortie optimale	Aucune représentation des feux et de la fumée
		Représentation géométrique de la structure	Les comportements de chaque individu ne sont pas pris en compte
		Utilisation d'un espace mémoire petit	Aucune implémentation du modèle
		Vitesse d'exécution élevée	La gestion de collision n'est pas prise en compte
Approche par analyse de graphe	L'article propose l'utilisation de techniques analytiques basées sur des modèles de réseaux filés d'attente et de graphes afin d'améliorer la planification des évacuations de bâtiments. Les techniques de la théorie des graphes sont utilisées pour identifier et ensuite renforcer les zones critiques. Par contre, les techniques de la théorie de file d'attente permettent d'estimer le temps d'évacuation et de déterminer la sortie optimale qui est en plus dynamique selon les circonstances. En effet, la théorie de file d'attente utilise des nœuds qui sont connectés entre eux pour résoudre le problème donné [Desmet 2013]	Un espace infini de paramètres et arbitrairement une haute résolution	
		Détection et visualisation des zones critiques (points de congestion)	Aucune implémentation du modèle
		Théorie de file d'attente permet d'estimer le temps d'évacuation et la sortie optimale. Modèle probabiliste pratique lorsque plusieurs paramètres sont incertains	Pas de représentation des feux et des fumées
		Détection de la sortie optimale (sortie dynamique)	La visibilité n'est pas prise en compte (faible visibilité pendant l'évacuation)
Approche par automate cellulaire	Particulièrement par rapport aux autres approches, celle de l'automate présente beaucoup plus de travaux de recherche. C'est un système dynamique discret qui offre une alternative attrayante pour faire face à plusieurs types de situations en raison de leur capacité à développer des comportements complexes à partir d'un ensemble simple de règles. Fondamentalement, tout est défini comme cellule et des règles permettent de spécifier le nouvel état d'une cellule en fonction de l'état des cellules voisines	Les comportements de chaque individu ne sont pas pris en compte	
		Gestion de collision et interactions entre les individus très performants	
		Pas de représentation des feux et des fumées	
		Implémentations du modèle dans EVAC	Aucune implémentation des feux et de la fumée
Approche SIG	L'approche se base sur 3 couches à savoir : 1. Première couche : la couche d'accès réservée aux administrateurs 2. Deuxième couche : la couche de fonction qui est le cœur du modèle. Elle est subdivisée en : Module de gestion de carte Module de surveillance d'urgence Module d'analyse d'évacuation d'urgence Module de statistiques de gestion Module de commande de répartition de secours et services de requêtes publiques 3. Troisième couche : la couche de données qui consiste à récolter les données en temps réel avec plusieurs types de capteurs : les données GPS collectées en temps réel, données sur la température et la fumée recueillies en temps réel par des capteurs de température et de la fumée. Ces diverses informations sont stockées dans une base de données Oracle [Tian zhuo 2015]	Plusieurs articles et travaux de recherche sur le même sujet	
		Gestion de direction très performante	
		Plusieurs travaux de recherches s'orientent dans le même sens	Pas de représentation de la fumée
		Permet de visualiser directement le chemin optimal pour la sortie	Pas de modélisation des pompiers essayant de combattre le feu
		Permet d'assurer une gestion efficace de l'environnement	Pas d'implémentation du modèle
		Permet d'obtenir des données d'information géographique précises	Pas de prise en compte des comportements individuels
		Permet la récupération en temps réel des données	La visibilité n'est pas prise en compte (faible visibilité pendant l'évacuation)
		Modèle modifiable qui s'adapte facilement à la modification du SIG	
		Pris en compte des paramètres comme : gaz toxique, explosion	

FIGURE 1 – tableau SWOT des modèles d'évacuation

Designation de l'approche	Description	Avantages	Limites
Approche par avis des experts (SEBES)	Intégration of Smoke Effect and Blind Evacuation Strategy un modèle probabiliste sur la base de stratégie de déplacement des aveugles En d'autres termes, les évacués doivent suivre les limites des obstacles comme mur pour trouver les sorties possibles lorsque leur visibilité est limitée en raison de la fumée Mais aussi, le modèle a été créé sur la base de deux experts : d'abord les experts en conception de bâtiment qui sont les architectes et les ingénieurs en bâtiments et travaux publics Ensuite, les experts en évacuation d'urgence l'avis de ces deux expert nous permet de créer un modèle plus réaliste [Nguyen 2013] Enfin, le modèle a été développé et implémenté dans GAMA plateforme [Amouroux 2007] et SIG [sig 2017]	l'année de création de l'article récent, inférieur à 5 ans (2013)	Pas de recherche de sortie optimale
		un modèle réaliste en prenant en compte plusieurs avis des experts dans plusieurs domaines (expert en construction et expert en évacuation)	Pas de pris en compte des comportements de chaque Individus
Approche par modèle dynamique (ESM)	ESM (Evacuation Modèle Simulation) consiste à créer un modèle dynamique C'est à dire que le modèle peut évoluer pour chaque situation donnée Le chemin de sorti peut changer en tous moment pour trouver optimale Très Intéressant puisque dans la majorité des cas, le chemin prévu pour l'évacuation au départ peut être bloqué et n'est plus praticable Le système à la possibilité de donnée plusieurs itinéraires possibles si tous les chemins sont disponible, il ordonne en fonction de l'urgence ESM utilise STELLA pour la simulation STELLA est une application de simulation développée par « High Performance Systems, Incorporation » aux États Unis Il peut simuler les flux entre différentes conteneurs et donner à l'utilisateur la conception de toutes les variables à contrôler les flux STELLA peut construire un diagramme en fonction de la situation réelle, qui est arrangé selon la disposition des planchers Elle est également capable de créer des équations système pour simuler les valeurs de différentes variables à différentes étapes de temps [Shen 2005]	le modèle SEBES a été modélisé et implémenter par les encadrants	Pas de gestion de collision et de la file d'attente
		Sortie dynamique selon la situation	La performance diminue lorsque les caractéristiques éparses sont utilisées
		Simulation du blocage dynamique de l'évacuation	Pas de représentation de la fumée
		Possibilité de définir plusieurs horaires possibles	Pas de modélisation des pompiers essayant de combattre le feu
		Visualisation de changement d'état	Pas de gestion de collision
		Description des valeurs de passages entre chaque compartiment	
		Identification du temps de compensation d'un compartiment	
		Possibilité de visualiser les occupants piégés dans chaque espace	
		Pris en compte des personnes avec la mobilité réduite	
		Implémentions du modèle dans STELLA	
Approche par séquençage vidéo	Utilise la théorie de file d'attente et la mécanique des fluides pour établir la théorie de la simulation du temps d'évacuation Avant de commencer, il faut avant tout avoir une base de vidéo qui stocke les séquences vidéo multiples pour analyser les caractéristiques du flux des Individus Il faut enregistrer les vidéos pendant les forts mouvements dans plusieurs angles et dans une forte circulation des Individus c'est à dire le matin Ensuite, le flux obtenu est utilisé pour la méthode d'acquisition vidéo telle que la vitesse et la densité dans les platesformes, les canaux de transfert, les portes automatiques et les escaliers [Zhou 2014]	Approche récente, année de sortie de l'article 2014	Prix élevé des matériels (plusieurs caméras)
		Analyse comportementale des individus avec multiple vues permet de mieux prédire les mouvements pendant l'évacuation	Stockage des données de taille élevée
		Théorie de file d'attente permet de mieux estimer la durée de l'évacuation	Pas de simulation des feux et de la fumée
		Analyse de flux permet de déterminer la sortie optimale	Pas d'implémentation du modèle
			Pas de pris en compte des comportements de chaque Individus
			Pas de gestion de collision

FIGURE 2 – tableau SWOT des modèles d'évacuation



## 5 Exemple de modèle et d'applications d'évacuation

Nous allons présenter dans cette partie un tableau comparatif des différents modèles d'évacuation, puis nous énumérerons quelques applications existantes qui traitent la simulation et évacuation d'un bâtiment « Simulex » et « Steps software ». Les deux outils ont été choisis principalement d'être présenté par rapport à leurs niveaux de popularité et de performance élevée.

### 5.1 Synthèse des modèles

les tableaux ci-contre illustrent cette synthèse

Modèle	Microscopique	Probabiliste		technique de simulation	Géométrie	Encombrement	Vitesse des occupants	Personnes avec besoin d'assistance	Personnel d'assistance	Aspect comportementaux	Feu
		Macroscopique	Déterministe								
			Stochastique								
EVACNET (1979-1986)	MACROSCOPIQUE		D	Programmation linéaire	Réseau	Oui (par interruption)	Pas de vitesse (temps de traversée de chaque arc)	Non	Non	Non	Non
BFIRES (1979-1982)	microscopique		P	Pas de temps	Mallage	Oui (par interruption)	Constante et uniforme	Oui	Oui (dédiés à l'éloignement du danger, assistance, hésitation)	Instinct grégaire, éloignement du danger, assistance, hésitation	Oui (éloignement du feu et des fumées)
EMBER (1982)	microscopique		D	Pas de temps	Réseau	Oui (par variation de vitesse)	Variable (fonction de la densité)	Oui	Oui	Assistance au déplacement	Oui (modèle simplifié du feu et de mouvement de fumée)
Mc GREGOR SMITH (1982)	MACROSCOPIQUE		DS	Algorithme MYA	Réseau de files d'attente	Oui (par interruption)	Pas de vitesse (temps de service dans chaque file)	Non	Non	Non	Non
ERM (1983-1985)	microscopique		D	Pas de temps	Réseau	Non	Constante (dépend de l'occurrence)	Oui	Oui	Assistance (à la préparation ou au déplacement)	Non
FES / MB	microscopique		P	Pas de temps	Arborescence d'évacuation continue	Non	Constante et uniforme	Oui (seulement d'être alertes)	Oui (pour alerter)	Alerter	Non
KENDIK / MAJOU (1985)	MACROSCOPIQUE		D	Pas de temps	Réseau d'éléments rectilignes	Oui (par variation de vitesse + capacités)	Variable (fonction de la densité)	Non	Non	Non	Non

FIGURE 3 – Tableau des caractéristiques des modèles

Tableau comparatifs des modèles d'évacuation

Modèle	Microscopique	Probabiliste		technique de simulation	Géométrie	Encombrement	Vitesse des occupants	Personnes avec besoin d'assistance	Personnel d'assistance	Aspect comportementaux	Feu
	Macroscopique	Déterministe									
TAKAHASHI / TAKANA (1987)	MACROSCOPIQUE	D		Pas de temps	Réseau de composants	Oui (par interruption)	Constante et uniforme	Non	Non	Non	Non
EXITT (1987-1988)	microscopique	D		Pas de temps	Réseau	Non	Dépend de l'occupant et de l'enfumage	Oui	Non (assistance par d'autres occupants)	Investiguer / réveiller / assister au déplacement	Données d'enfumage en entrée influent sur le comportement et la vitesse
EXITT89 (1991)	microscopique	D		Pas de temps	Réseau	Oui (par variation de vitesse)	Variable (fonction de la densité)	Non	Non	Non	Oui Données d'enfumage en entrée = blocages
AGORA (1990-1992) / PRETECHENSKII	MACROSCOPIQUE	D		événementiel	Réseau d'éléments rectilignes	Oui (par variation de vitesse + capacités)	Variable (fonction de la densité)	Non	Non	Temps de latence	Non
AGORA / SENSIBILITE	microscopique	P		événementiel	Réseau	Oui (par variation de vitesse)	Variable (fonction de la densité)	Non	Non	Temps de latence, changement de chemin a cause de la fumée	Non
AGORA / FILES D'ATTENTE	MACROSCOPIQUE	DS		MVA modifiée ou pas de temps	Réseau	Oui (par variation de vitesse ou de débit)	Variable (fonction de la densité) pour la version MVA non standard	Non	Non	Non	Non
EVACSIM	microscopique	S		Algorithme QNAP2	Réseau	Oui (par variation de vitesse + capacités)	Variable (fonction de la densité)	Non	Non	Temps de latence	Non

FIGURE 4 – tableau des caractéristiques des modèles

Modèles	Caractéristiques
Togawa [Tog55]	En se fondant sur les observations relatives à une foule réelle, l'auteur propose une formule permettant de calculer la vitesse de déplacement d'une foule par rapport à sa densité (une densité normale) dans les bâtiments à plusieurs étages (la vitesse sera la même pour toute la foule du bâtiment).
Melinek & Booth [MB75]	Proposent un modèle permettant de calculer la vitesse d'évacuation d'une foule pour chaque étage d'un bâtiment, où sont considérés deux types de densités soit une densité maximale à chaque étage. Soit une densité normale.
Pauls [PoBR75]	Se fondant sur l'observation d'exercices d'évacuation d'immeubles de bureaux de grande hauteur, l'auteur a établi une loi permettant de simuler l'évacuation au niveau des escaliers en fonction du débit unitaire en personne /seconde/mètre de largeur d'escalier et du nombre de personnes par mètre de largeur d'escalier.
Predtechenskii & Milinskii [PM78]	Propose un modèle fluide basé sur des calculs statistiques dont le but est de gérer les mouvements de foules de grande densité. Il permet de calculer la vitesse de déplacement de la foule en fonction de sa densité et des conditions d'évacuations (normal, urgent, confortable).
Takahashi, Tanaka & Kose [TTK88]	- Propose aussi un modèle fluide permettant de calculer la vitesse d'évacuation. Ce modèle repose sur une description simplifiée de l'environnement avec une caractérisation des espaces (escaliers, couloirs, ...).

FIGURE 5 – Tableau comparatif des modèles d'évacuation

## 5.2 Simulex

Une application pour modéliser l'évacuation des personnes utilisant l'analyse spatiale. Il se concentre sur les aspects physiques des occupants et leurs eet dans l'évacuation. Chaque plan d'étage et chaque escalier dans un bâtiment est aché dans une autre fenêtre de visionnement diérentes. Simulex dénit un bâtiment à plusieurs étages comme une série de plans d'étage bidimensionnel qui sont reliés par des escaliers [Thompson 1997]. Un exemple de simulation avec « SIMULEX »

Avantage :

- Visualisation 2D et 3D ;
- Logiciel est capable de modéliser de grands bâtiments géométriquement complexes ;
- On peut voir le mouvement de chaque individu durant tout l'évacuation ;
- Stockage des informations détaillées sur l'évacuation ;
- Un espace inni de paramètres et arbitrairement une haute résolution. Limite :
- Application n'est pas multi-plateforme ;
- Pas d'implémentation de la propagation du feu et de la fumée ;
- Se limite seulement à l'évacuation des personnes.

### **5.3 Jeu de données Système d'Informations Géographiques 3D SIG**

Des études ont été menées pour explorer le développement de modèles 3D afin d'étendre la visualisation 2D et les analyses spatiales des SIG traditionnels à la 3D, en particulier dans l'environnement urbain intérieur pour les études d'évacuation des bâtiments (Lee, 2007 ; Thill, 2011) et aussi pour modéliser les relations réseau 3D de la structure intérieure des bâtiments pour rendre disponibles des analyses 3D basées sur les SIG, en particulier pour le calcul des routes d'évacuation et des possibilités de sortie (Lee Zlatanova, 2008 ; Meijers, Zlatanova Pfeifer, 2005).

### **5.4 Simulation de l'évacuation d'un bâtiment**

La modélisation et la simulation basées sur les agents (ABMS) a été décrite comme une nouvelle méthodologie pour modéliser les systèmes de "agents d'interaction autonomes". Les progrès réalisés dans ce domaine ont permis d'accroître la capacité de calcul du nombre de modèles à base d'agents dans différents domaines d'application (Macal et North, 2008). La simulation basées sur les agents et les modèles de simulation ont été incorporés aux SIG pour les études d'évacuation des bâtiments afin de modéliser le mouvement des individus et examiner de multiples scénarios pour la planification de l'évacuation et les intervention d'urgence dans les réseaux intérieurs (Chen, 2011 ; Kwan et Lee, 2003 ; Rosetti et Ni, 2010 ; Tang et Zhang, 2008 ; Uno et Kashiya, 2008). Ces modèles de simulation ont été mis en œuvre avec succès dans les mouvements de foule en 2D dans les parcs ou dans les théâtres en situation d'urgence qui ont fourni des informations sur le L'ensemble de l'évacuation et a contribué à optimiser l'état de préparation et l'efficacité de l'opération et la planification de l'intervention (Bo et Yong-gang, 2009).

## 6 Proposition de solution

### 6.1 Résumé de la Solution

Notre solution sera basée sur un couplage de la modélisation basée sur l'agent (ABM) et la 3D GIS. Ce couplage permettra d'élaborer des modèles de simulation en vue d'améliorer l'efficacité de l'analyse des données spatiales et des processus spatiaux. C'est le concept d'un modèle de géo-simulation multi-agents qui utilise modélisation basée sur les agents pour la simulation de ces derniers. L'utilisation des données géographiques permet d'analyser comment les différents agents interagissent et changent dans l'espace et dans le temps (Mekni et Haddad, 2010 ; Crooks, Hudson-Smith et Patel, 2010).

### 6.2 Justification du choix

Cette recherche vise à mettre au point un modèle de géo-simulation multi-agents pour l'évacuation des bâtiments qui sera basé sur l'ensemble de données 3D GIS du bâtiment de l'étude de cas. Plus précisément, l'étude vise à explorer et à évaluer le processus de l'implémentation de la simulation GAMA dans un SIG 3D continu l'environnement. Le modèle qui en résulte vise à compléter le modèle et améliorer les méthodes traditionnelles d'évacuation des bâtiments, la planification et la gestion, comme les exercices d'intervention en cas de tremblement de terre et d'incendie, ainsi que pour servir de cadre à d'autres projets d'aménagement de l'espace intérieur, des analyses de simulation de l'environnement, telles qu'une simulation intérieure assistée par SIG l'intervention en cas d'urgence.

### 6.3 Méthodologie de la recherche

Dans le cadre de cette recherche, l'ensemble de données SIG 3D a été élaboré avec le logiciel QGIS 3.4. Ces données ont par la suite été utilisé comme intrant pour l'élaboration d'une étude de cas du modèle de géo-simulation multi-agents utilisant la plateforme GAMA. la plateforme GAMA a été choisie parce qu'elle est une plate-forme d'architecture "environnement complet de développement de modélisation et de simulation pour construire des modèles de simulations multi-agents spatialement explicites" (Grignard et al., 2013). Fondamentalement, la méthodologie suit une méthode processus simple comme le montre la Figure ci-dessous



FIGURE 6 – Méthodologie de la recherche



## 6.4 Modèle proposé

L'environnement spatial intérieur 3D pour le modèle basé sur les agents est modélisé à partir de l'ensemble de données SIG 3D pour créer les "agents" représentatifs des étages, des salles, des chemins intérieurs et des points Exit du bâtiment et du fire. Un agent PEUPLE est modélisé pour représenter les occupants du bâtiment qui seront évacués dans la simulation. Chaque agent ROOMS a une sortie désignée prédéterminée de l'analyse 3D GIS dans QGIS. Pour la simulation d'essai, le nombre d'agents PEUPLE à occuper chaque pièce est 2 par chambre.

L'agent INDOOR\_PATHS est modélisé dans GAMA sous forme de graphique géométrie de couche composée de bords et de nœuds. Par défaut, une carte de poids est incorporée à la couche graphique en utilisant la longueur correspondante de chaque segment de ligne. Pour refléter les effets du type de trajet, par exemple pour les escaliers, un multiplicateur de vitesse est ajouté à la carte de poids de l'agent INDOOR\_PATHS. GAMA est programmé pour lire l'attribut "multiplicateur" qui a les valeurs 0.5 pour les escaliers et 1.0 pour les autres chemins. Cependant en GAMA, les poids sont inversement proportionnels à la vitesse de l'agent de déplacement. Ainsi, le multiplicateur est ajouté à la carte de poids par défaut en multipliant sa valeur réciproque.

Les attributs préliminaires programmés pour les agents PEOPLE sont la vitesse, l'emplacement de la pièce, la sortie de la cible et l'étage d'origine. La vitesse est réglée sur 2km/h. L'emplacement de la salle est basé sur l'attribut de l'agent ROOMS s'il s'agit d'une salle occupée. La sortie cible est réglé en fonction de l'emplacement de la pièce où se trouve l'agent PEOPLE et l'étage d'origine est attribué lors de sa création.

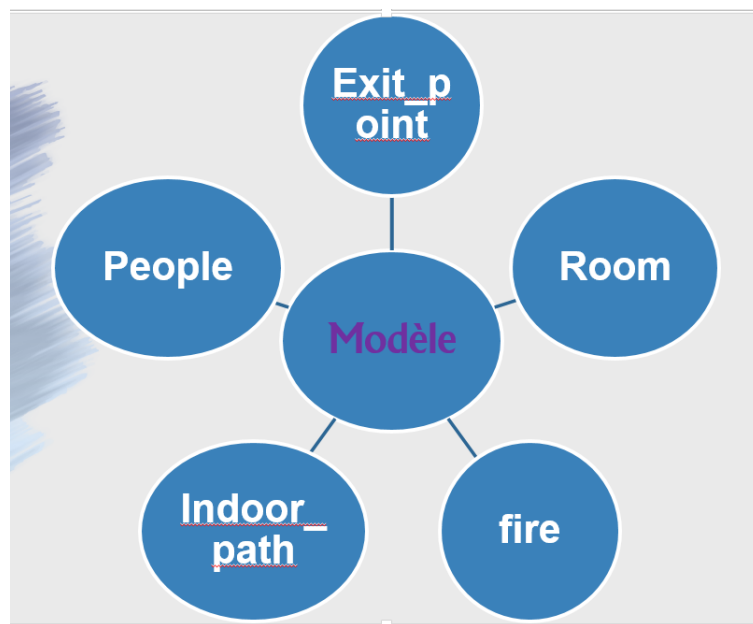


FIGURE 7 – Méthodologie de la recherche

### 6.4.1 Particularité de notre modèle

le point fort de notre modèle réside dans l'utilisation de l'agent INDOOR\_PATHS qui constitue un tracé de routes à base de graphe dans l'immeuble. Ces routes ayant des poids permettront aux agents People de recalculer à chaque fois le meilleur chemin si il détecte un obstacle ou un regroupement de personnes à une entrée. Cela est en effet possible à cause d'un reflex que nous avons intégré à l'agent People.

## 6.5 Choix des outils de travail

Les outils utilisés pour réaliser ce travail de recherche sont les suivants :

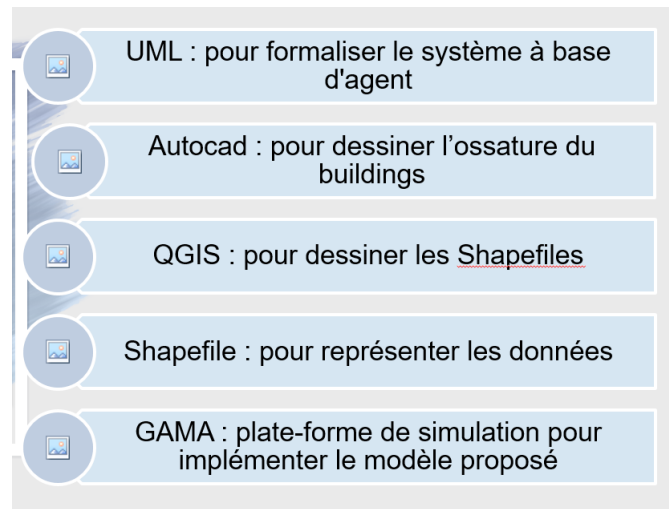


FIGURE 8 – Outils utilisés

## 6.6 Contour de la solution : Immeuble objet de notre modélisation

Dans cette partie, nous présenterons quelques aspects de l'immeuble devant faire l'objet de notre modélisation. Pour arriver à modéliser et faire la simulation sur la plateforme GAMA, il faut au préalable avoir le modèle Shape qui représente le building. Pour ce, à partir du plan du building comme ce qui est fournit dans les deux figures suivantes, on modélise dans AutoCAD puis dans QGIS, la représentation selon le plan pour la simulation.



FIGURE 9 – Vue de face de la cité à modéliser avec l'entrée principale



FIGURE 10 – Vue de face de la cité à modéliser

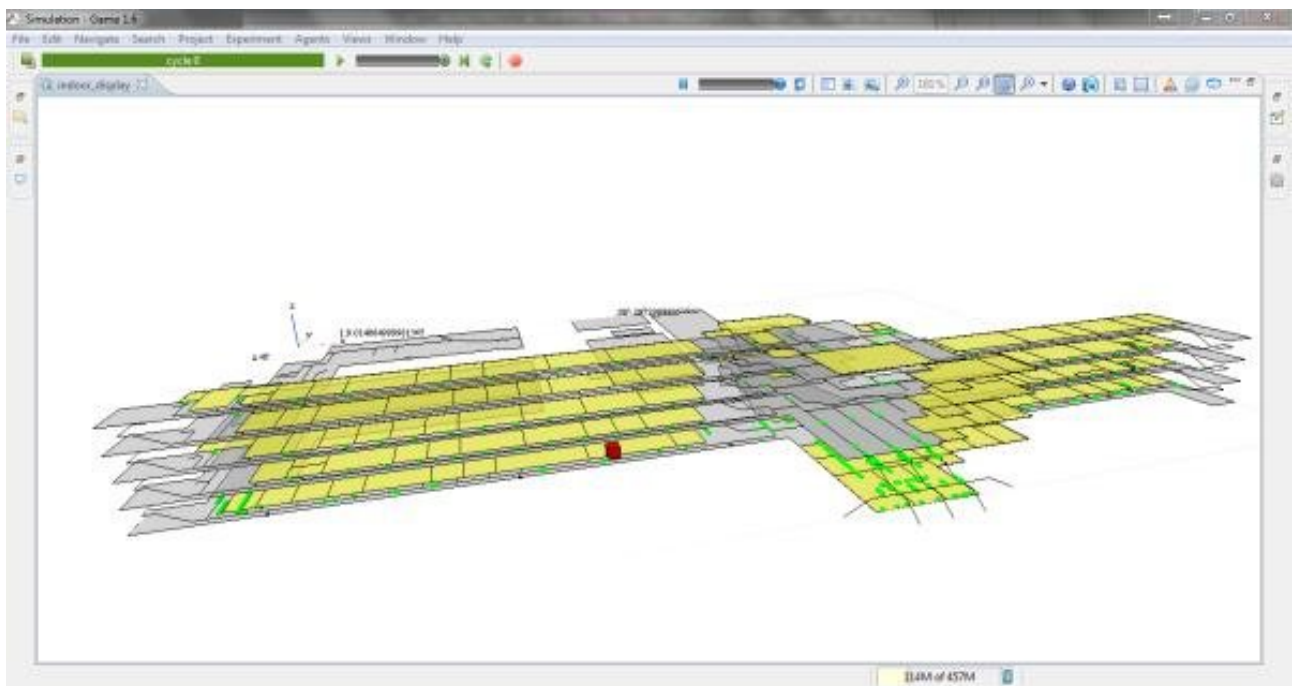


FIGURE 11 – Tracé du plan sur QGIS

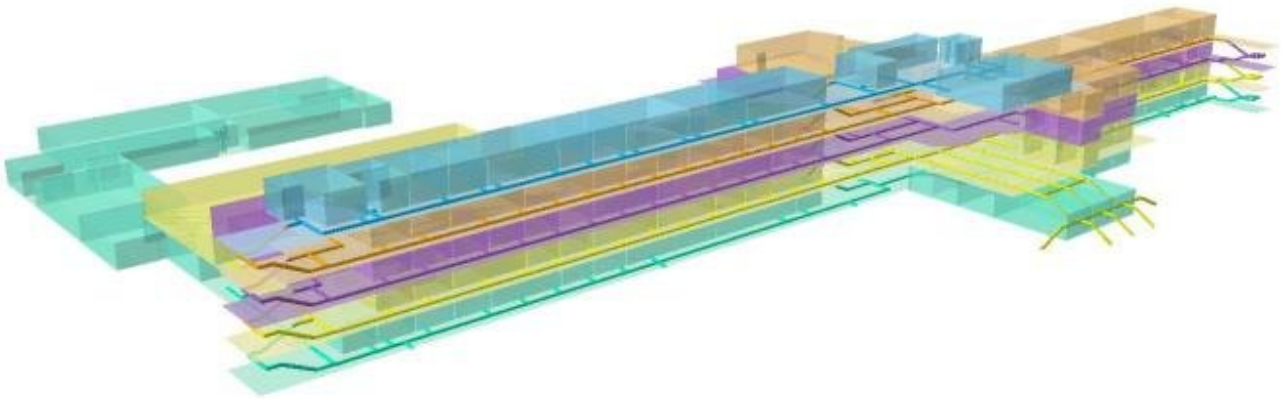


FIGURE 12 – Visualisation 3D de l'immeuble montrant l'ossature des chambres et des sorties obtenu avec QGIS et Arcscene

## 7 Expérimentation et et analyse des résultats

Tous les expérimentations vont être réalisé sur diérent type de Conguration de bâtiment pour vérifier la capacité du modèle à supporter les paramètres.

Dans la figure ci-dessus, la couleur des agents Room est réglée sur "rouge" si occupé par des agents People et "jaune" s'il n'est pas occupé. Les points de sortie (exit\_point) sont matérialisés sous forme de carrés et les agents People sous forme d'objets ".obj".

Au cours de la simulation, les agents PEOPLE "se déplacent" vers la sortie cible le long du chemin IN-DOOR\_PATHS. Un compteur est paramétré pour compter le nombre d'agents PEUPLE créés. Aussi, pour chaque étage et le temps d'évacuation est surveillé à l'aide de la fonction dans GAMA. Le graphique montre une courbe linéaire avec le nombre de personnes pour chaque étage au fil du temps, ainsi qu'une tarte graphique montrant la répartition en pourcentage de la population dans chaque région par rapport à la population totale. Des captures d'écran illustrent les résultats. Dans cette simulation particulière, le nombre d'agents PEUPLE créés par étage est consigne dans le tableau suivant :

Comme on peut voir les résultats de la simulation après 3 min tous les agents ont été évacués. les figures ci-dessous illustrent au mieux ces aspects



Floor	People
1er etage	30
2e etage	38
3e etage	32
4e etage	34
5e etage	20

FIGURE 13 – Tableau de répartition des agents aux différents étages



FIGURE 14 – Visualisation 3D de l'immeuble montrant l'ossature des chambres et les occupants

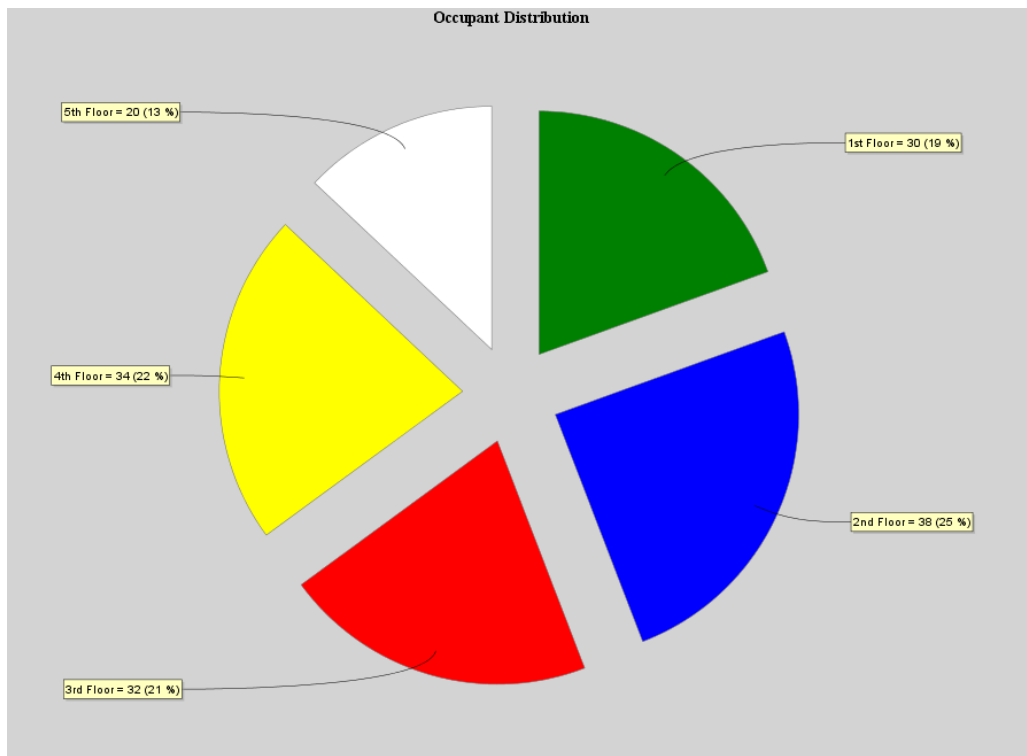


FIGURE 15 – Diagramme initial de répartition des agents aux différents étages

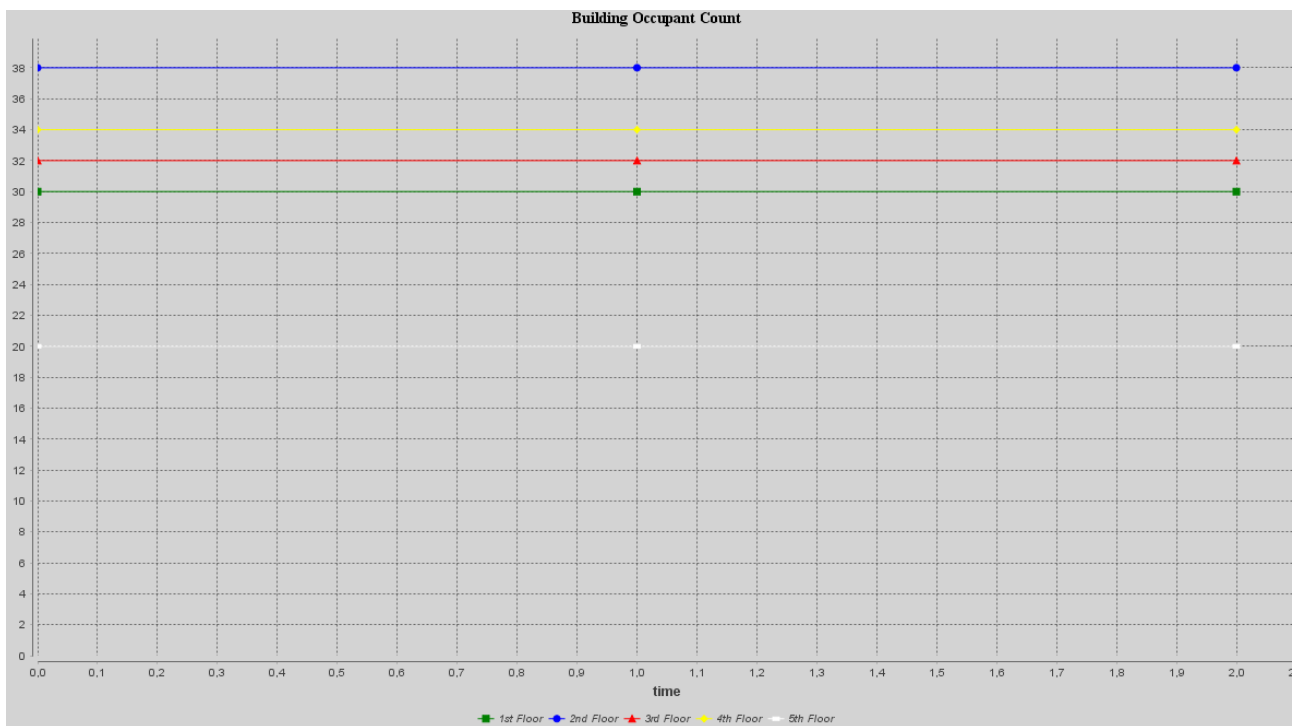


FIGURE 16 – Courbe initiale de répartition des agents aux différents étages

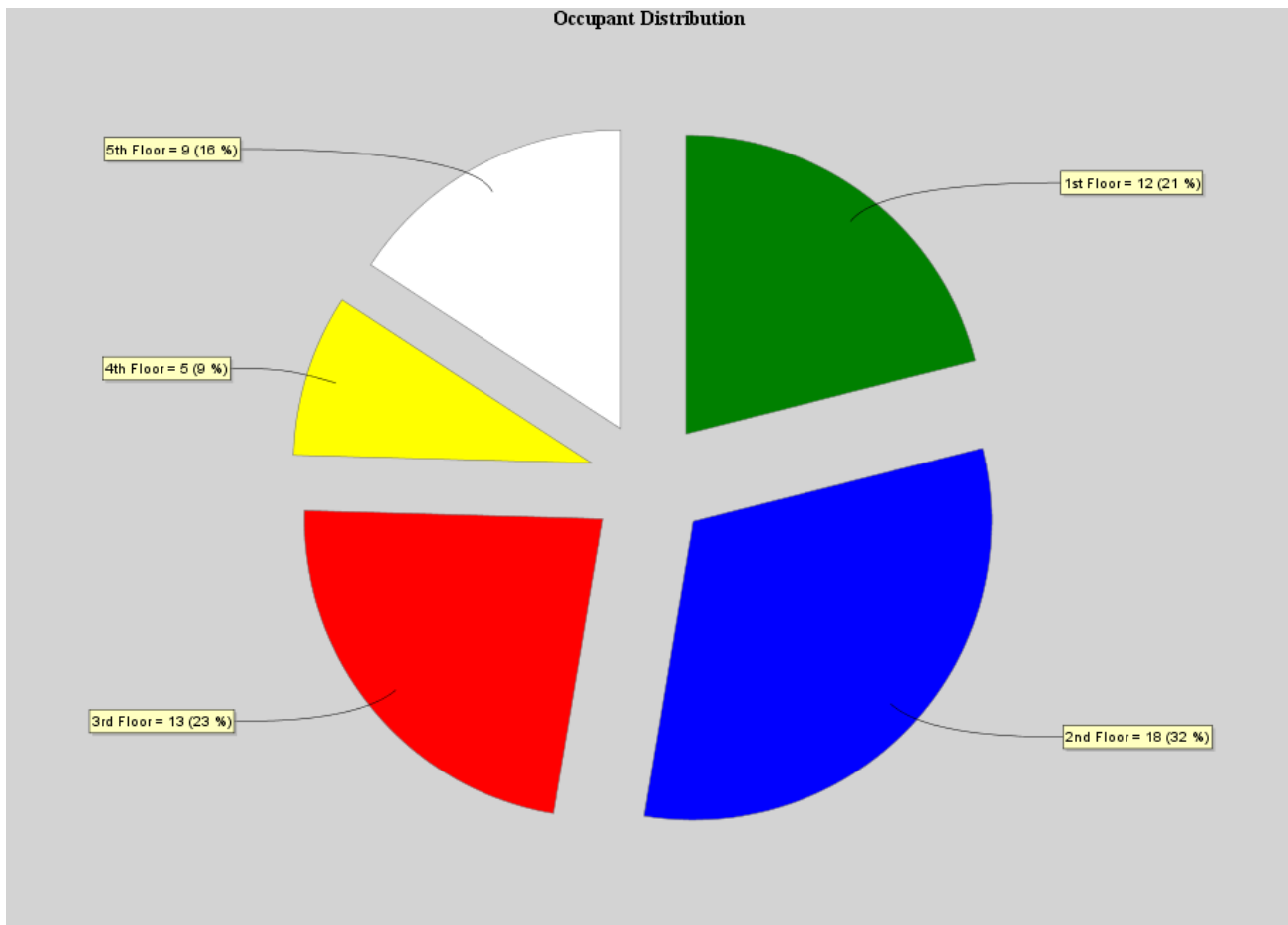


FIGURE 17 – Diagramme intermédiaire de répartition des agents aux différents étages

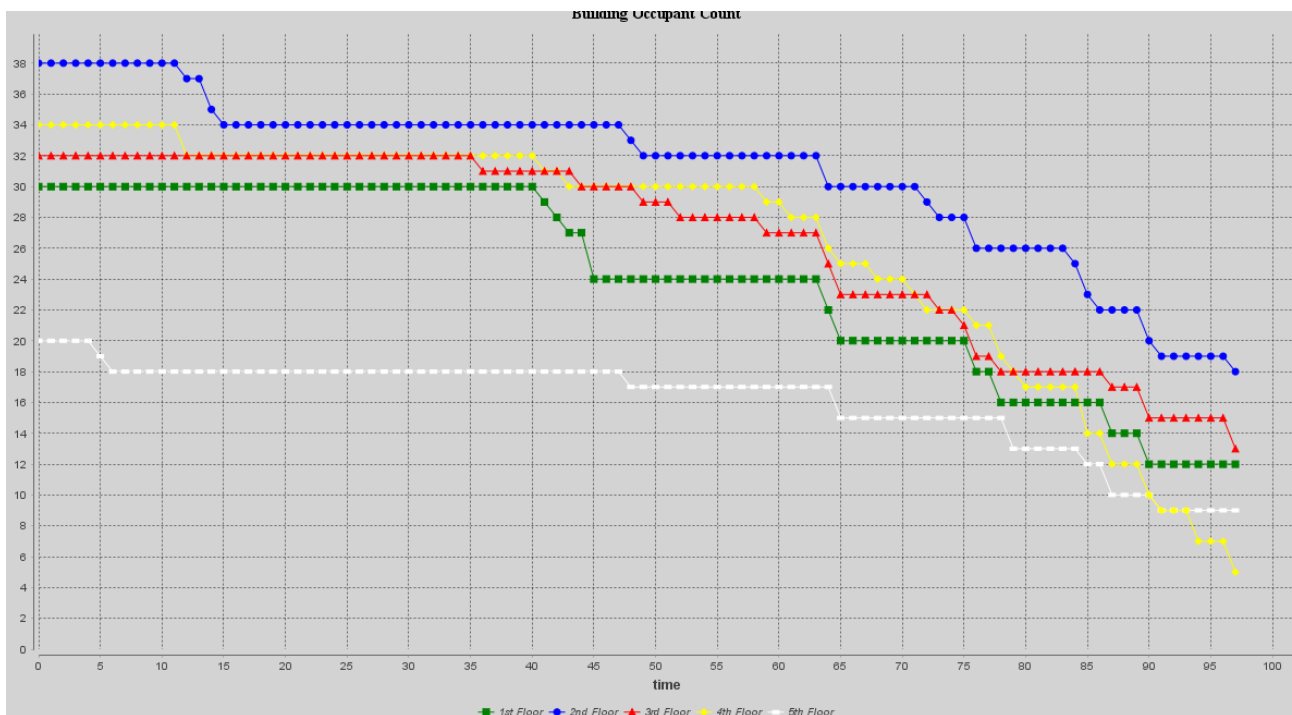


FIGURE 18 – Courbe intermédiaire de répartition des agents aux différents étages

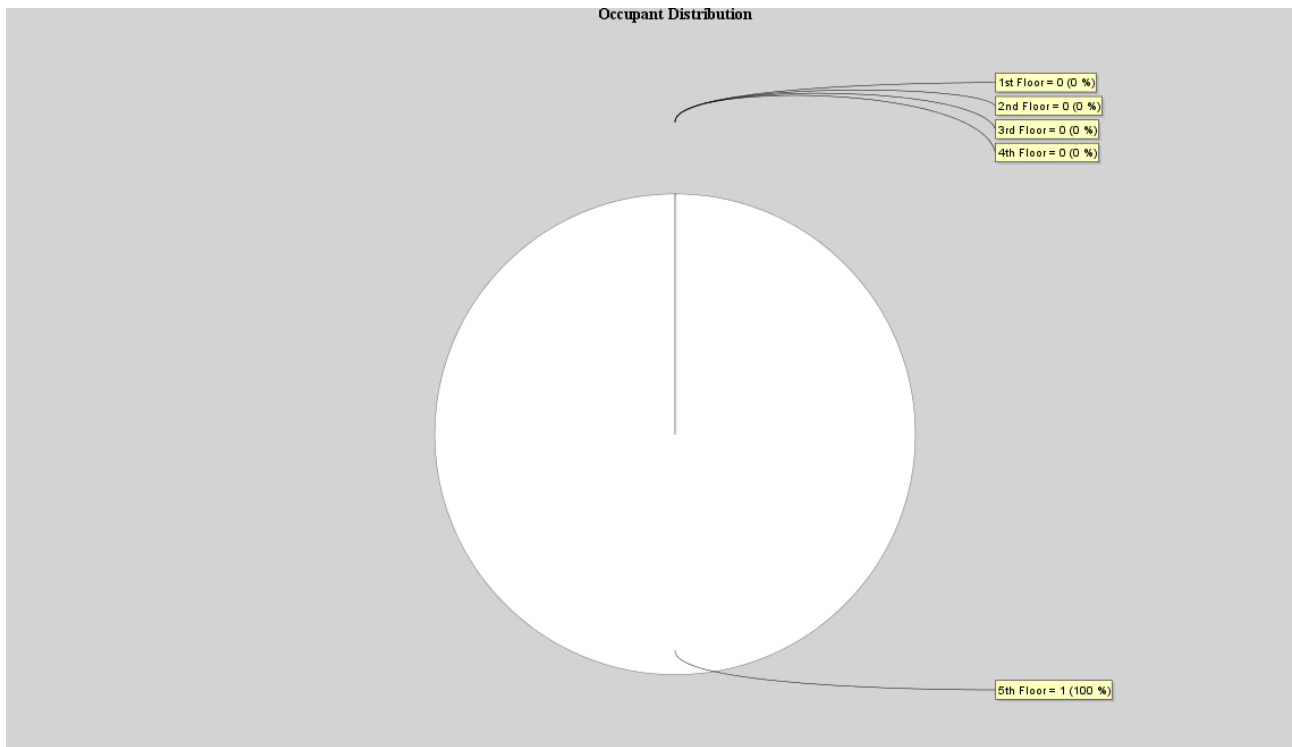


FIGURE 19 – Diagramme finale de répartition des agents aux différents étages

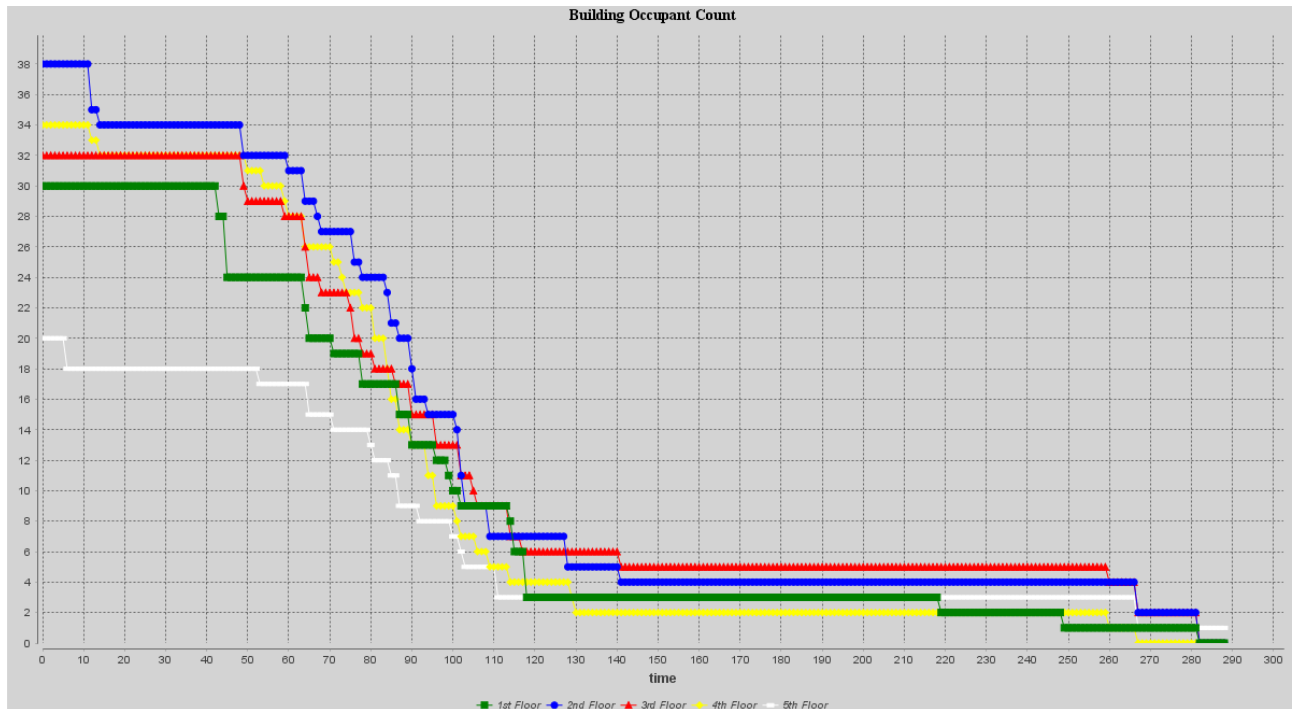


FIGURE 20 – Courbe finale de répartition des agents aux différents étages



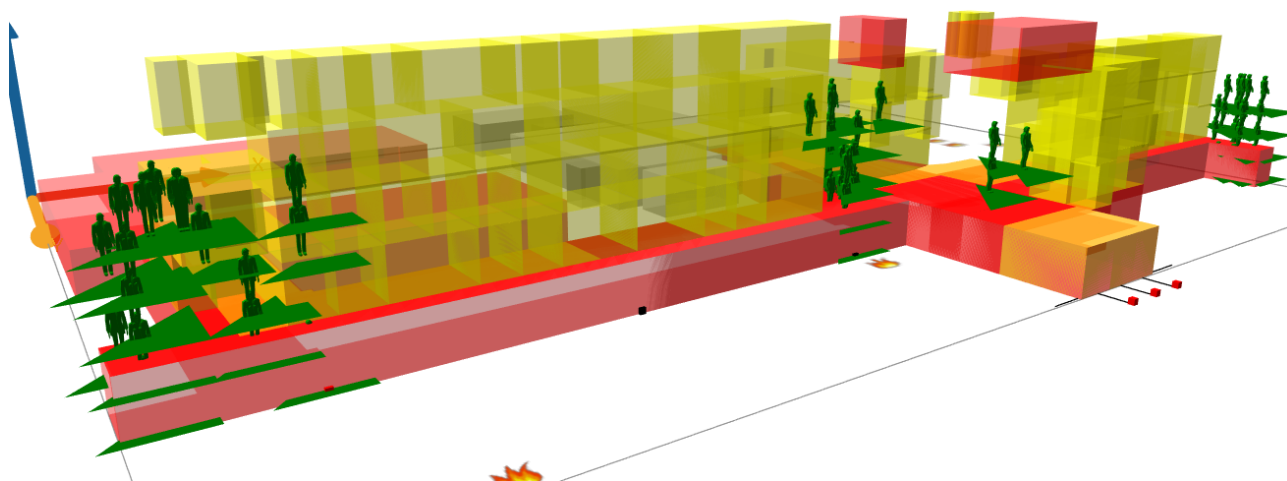


FIGURE 21 – Visualisation 3D de l'immeuble montrant l'ossature des chambres et les occupants

## RECOMMANDATION

Afin d'améliorer les performances de la simulation, telles que dans la modélisation d'un nombre plus réaliste d'occupants d'un bâtiment, il s'agit ici de recommander aux développeurs de la plateforme GAMA d'examiner le code de simulation et de faire des ajustements nécessaires. Les ajustements nécessaires. L'opinion d'un autre programmeur tel que les développeurs de GAMA et de sa communauté en ligne peuvent être un atout majeur pour l'amélioration de ce travail. Les plugins de GAMA pour PostGreSQL sont suggérés à cause de ces capacités de lecture-écriture automatique dans une base de données géospatiales.

## CONCLUSION

La plate-forme de simulation GAMA s'est avérée facile à apprendre et à mettre en œuvre pour la modélisation multi-agents des données SIG sous forme d'intrants. De plus, ses fonctionnalités 3D permettent la modélisation d'un réseau 3D continu pour un environnement spatial intérieur et Visualisation 3D de la simulation de l'agent. Toutefois, le programmeur occasionnel a besoin d'investir un peu de temps pour se familiariser avec le logiciel avec la langue maternelle de GAMA, L'intégration rapide des modèles à base d'agents et le SIG est activé par GAMA, bien qu'il ne soit que faiblement couplé.

L'utilisation d'un modèle 3D peut vraiment aider à mieux visualiser et analyser différents scénarii d'évacuation pour obtenir plus d'informations et de compréhension du processus. La flexibilité et la capacité d'effectuer un nombre différent de scénarios de simulation et les scénarios de simulation sont souvent avantageux pour la planification et la gestion de l'évacuation des bâtiments. Cependant, la modélisation du comportement des occupants d'un bâtiment en est une des éléments critiques d'une évacuation efficace d'un bâtiment. Dans cette étude, la comparaison de différents résultats de simulation permet d'améliorer l'analyse du processus d'évacuation.

## Références

- [1] K. Togawa, Study on fire escapes based on the observation of multitude currents, Building Research Institute, Ministry of Construction of Japan, 1963.
- [2] J. Pauls, The movement of people in buildings and design solutions for means of egress, Fire technology, 20(1) : 27–47, 1984.
- [Helbing 2003] Dirk Helbing, Motonari Isobe, Takashi Nagatani et Kouhei Takimoto. Lattice gas simulation of experimentally studied evacuation dynamics. Physical review E, vol. 67, no. 6, page 067101, 2003.
- [Gro 2017] Groupementpréventionincendie-SDIS85. memento sécurité incendie, jun 2017. [http : //www.sdis85.com](http://www.sdis85.com).
- [Amouroux 2007] A. Boucher A. Drogoul GAMA Amouroux C. Quang. GAMA : an environment for implementing and running spatially explicit multi-agent simulations. 10th Pacic Rim International Workshop on Multi-Agents (PRIMA), 2007.
- [Desmet 2013] Antoine Desmet et Erol Gelenbe. Graph and analytical models for emergency evacuation. Future Internet, vol. 5, no. 1, pages 46–55, 2013.
- [Isobe 2004] Motonari Isobe, Dirk Helbing et Takashi Nagatani. Experiment, theory, and simulation of the evacuation of a room without visibility. Physical Review E, vol. 69, no. 6, page 066132, 2004.
- Manh Hung Nguyen, Tuong Vinh Ho et Jean-Daniel Zucker. Integration of Smoke Eect and Blind Evacuation Strategy (SEBES) within re evacuation simulation. Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 36, pages 44–59, 2013.
- Rossetti, M.D. and Ni, Q., 2010. Simulating large-scale evacuation scenarios in commercial shopping districts : methodologies and case study. in : Winter Simulation Conference, IEEE, pp. 3494-3505
- Tang F. and Zhang X., 2008. A GIS-Based 3D Simulation for Occupant Evacuation in a Building. Tsinghua Science and Technology, 13(S1), pp. 58-64
- Thill, J.C., Dao, T.H.D. and Zhou, Y., 2011. Traveling in the Three-Dimensional City : Applications in Route Planning, Accessibility Assessment, Location Analysis and Beyond. Journal of Transport Geography, 19 (3), pp405-421.
- Uno, K. and Kashiyaama, K., 2008. Development of simulation system for the disaster evacuation based on multi-agent model using GIS. Tsinghua Science and Technology, 13(S1), 348-353