Université Polytechnique HAUTS-DE-FRANCE

Thèse de doctorat

Pour obtenir le grade de Docteur de

L'Université Polytechnique Hauts-de-France

Spécialité Automatique

Présentée et soutenue par Ahmed HAMIEH

Le 06/11/2018, à Valenciennes

Ecole doctorale

Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)

Equipe de recherche, Laboratoire

Département Automatique - Thème : Systèmes Intelligents Coopérants (SIC)

Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH UMR CNRS 8201)

Planification automatique de chemins à l'intérieur de bâtiments basée sur un modèle BIM

JURY

Président du jury

- ROUCOULES Lionel — Professeur, Arts et Métiers ParisTech, CER d'Aix-en-Provence - LISPEN, France.

Rapporteurs

- BRIL-EL HAOUZI Hind — Maître de Conférences HDR, Université de Lorraine - CRAN, France.
- EYNARD Benoit — Professeur, Université de Technologie de Compiègne - ROBERVAL, France.

Examinateurs

- LAMOURI Samir — Professeur, Arts et Métiers ParisTech CER de Paris - LAMIH, France.
- LAUDATI Patrizia — Professeur, Université Polytechnique Hauts-de-France - DeVisu, France.

Directeur de thèse

- DENEUX Dominique — Professeur, Université Polytechnique Hauts-de-France - LAMIH, France.

Résumé :

Plus de la moitié de la population mondiale vit aujourd'hui en zone urbaine et passe plus de 90 % de son temps à l'intérieur de bâtiments. Cette thèse propose un système, nommé BiMov, de planification automatique de chemin à l'intérieur de bâtiments, basé sur leur maquette numérique (un BIM au format IFC). Le processus consiste à exploiter les caractéristiques sémantiques, géométriques et topologiques des constituants du BIM afin de générer des graphes de navigation possible, en fonction du profil du navigant et de l'état conjoncturel d'accessibilité des espaces et transitions, dans lesquels le plus court chemin d'un point à un autre puisse être déterminé. BiMov s'appuie sur quatre modèles de données (1) un modèle de bâtiment déduit du BIM, qui représente et structure les caractéristiques essentielles du bâtiment en vue de la mobilité intérieure (2) un modèle de navigant à même de représenter ses caractéristiques d'encombrement, ses aptitudes aux déplacements horizontaux et verticaux ainsi que ses habilitations (3) un modèle de calendrier permettant de connaître l'état d'accessibilité des espaces et des transitions (4) un modèle de graphe sur trois niveaux de détails. Le niveau Macro représente un simple graphe de connectivité entre les espaces intérieurs voisins ; il permet aux architectes de vérifier leur conception architecturale en termes d'accessibilité. Le niveau Externe permet de connecter les espaces accessibles via leurs transitions horizontales ou verticales. Il est destiné aux navigants qui n'exigent pas un chemin détaillé pour se déplacer. Le niveau Interne intègre un maillage des espaces, en 2D pour la navigation au sol, en 3D pour la navigation de drones. Il est conçu pour considérer les obstacles intérieurs comme les meubles, les machines ou les équipements. Ce niveau est destiné aux navigants devant fiabiliser leur déplacement à l'intérieur des espaces, comme les manutentionnaires d'objets encombrants ou les robots mobiles. L'approche proposée a fait l'objet d'un développement informatique qui permet d'illustrer quelques scénarios de planification de chemin dans des modèles BIM d'origine externe à la thèse.

Mots-clés : bâtiments, planification de chemin, navigant, BIM, IFC

Abstract:

More than 50% of humans today live in urban areas and spend more than 90 % of their time indoor. This thesis suggests a system, called BiMov, dedicated to automatic path planning in complex building based on their digital mockup (a BIM in IFC format). The process consists in exploiting the semantic, geometric and topologic features of the constituents of a BIM, so as to generate navigation graphs, taking into account the profile of Navigants as well as the operational state of accessibility of spaces and transitions, for finally determining a shortest path. BiMov is based on 4 data models: (1) a building model deduced from the BIM that represents and structures the building features that are relevant for indoor mobility (2) a Navigant model capable to represent its bulk size, abilities for horizontal and vertical displacements and social habilitations (3) a calendar model representing the conjectural state of accessibility of spaces and transitions (4) a navigation graph model with three levels of detail: the Macro level represents a simple graph of connectivity between neighboring interior spaces. It is intended to help architects verify their architectural design in terms of accessibility. The Extern level is used to connect accessible spaces via their horizontal or vertical transitions. This level is intended for Navigants who do not require a detailed path. The Intern level integrates a meshing of each space: a 2D mesh for planar mobility or a 3D mesh for drones. This level is intended for Navigants like bulky objects handlers of mobile robots, needing to validate a reliable path within spaces containing furniture, machinery or equipment. The proposed approach was implemented in a prototype software that allows to illustrate different path planning scenarios in BIM models that were generated externally.

Keywords: building, path planning, Navigant, BIM, IFC

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier tous les membres du jury, Hind Bril-El Haouzi et Benoit Eynard, rapporteurs, Samir Lamouri, Patrizia Laudati et Lionel Roucoules, examinateurs, pour le temps consacré à la lecture de ce travail de thèse.

Je tiens également à remercier Christian Tahon d'avoir accepté de diriger le travail de thèse avec Dominique Deneux. Un grand MERCI à Dominique qui m'a encadré pendant ces 4 ans. Merci pour ta disponibilité, pour les échanges d'idées, pour tes précieux conseils, pour le temps passé à corriger le manuscrit, pour ta confiance et pour ta patience. Enfin, merci de m'avoir toujours soutenu et d'avoir toujours cru en moi et en nos recherches, même dans les périodes difficiles.

C'est aussi avec un plaisir tout particulier que je remercie Thomas PAVIOT. Sa haute compétence technique et ses précieuses suggestions ont largement contribué à accélérer le rythme de travail de développement informatique.

Je tiens à remercier aussi les étudiants en double cursus de l'ENSIAME Mohamed Ennajih, Sofiya Monaji, Renan Ermida, Bakr Agoumi, Dan Zhao et Outman Ksim d'avoir participé aux développements informatiques de cette thèse dans le cadre de leur projet.

Je remercie aussi tous les personnels et les doctorants du LAMIH, spécifiquement le chef de notre équipe SIC Damien Trentesaux, Sondès Chaabane, Abdelghani Bekrar, Corinne Aureggi et Maureen Courbez qui ont participé à ce doctorat à leur manière.

Ensuite, je remercie ma famille de Valenciennes Sandro, Jocelene, Nadya, Ahmad, Ghada, Fadoua, José, Wassim, Amine, Ayush, Ali, Chadab, Ahlem, Marwa, Taisa, Saleh, et Pipoka pour les bons moment, les pauses cafés plus que quotidiennes, les Barbecues qui ont participé à la vie et à la bonne ambiance.

Un grand MERCI à ma famille mon père, ma chère mère, mes frères, mes sœurs et ma tante d'avoir cru en moi et de m'avoir donné depuis toujours l'opportunité de poursuivre mes objectifs personnels et professionnels et merci pour tout l'amour que vous portez pour moi. MERCI à ma belle-famille ma chère belle-mère, mon beau père, Bilal, Fatima, Rime, et Rayane d'avoir toujours été à mes côtés. Merci à mon beau-frère et mon colocataire Mohamed de m'avoir supporté pendant 2 ans et pour les bons moments qu'on a passés ensemble.

Enfin, je remercie de tout mon cœur ma femme et l'amour de ma vie Nour Bousaleh (Nanous). Merci d'être toujours à mes côtés, de m'avoir supporté et soutenu depuis qu'on se connait. Merci d'avoir supporté la distance pour faire cette thèse, Merci pour ta patience. Merci pour les bons moments qu'on a vécus ensemble et pour ta bonne humeur qui m'a donné l'énergie pour finir ce doctorat. Enfin, MERCI d'être dans ma vie.

Table des matières

Introduction générale ---------- 15
Originalité de la thèse ---------- 16
Organisation du mémoire ---------- 17

Chapitre 1 : La planification de chemin dans les bâtiments complexes ---------- 19
1.1 Introduction à la planification de chemin ---------- 19
1.1.1 Intérêt de la planification de chemin ---------- 19
1.1.2 Termes connexes à la planification de chemin ---------- 20
1.1. 3 Critères de sélection d'un chemin ---------- 24
1.2 Comment planifier son chemin ? ---------- 25
1.2.1 Exigences pour l'aide à la navigation intérieure ---------- 29
1.2.1.1 Référentiel ---------- 29
1.2.1.2 Technologie de localisation ---------- 30
1.2.1.3 Système de planification de chemin ---------- 30
1.3 Planification de chemin intérieur ---------- 31
1.3.1 Intérêt de la planification de chemin intérieur ---------- 31
1.3.2 Défi et problème de recherche ---------- 33
1.4 Conclusion ---------- 35

Chapitre 2 : Etat de l'art ---------- 37
2.1 Introduction ---------- 37
2.2 Modèles de bâtiments ---------- 37
2.2.1 Modèle CAO 2D/3D ---------- 38
2.2.3 Building Information Modeling (BIM)/ IFC ---------- 39
2.2.3.1 Recherche scientifique autour de BIM ---------- 40
2.2.3.2 Architecture des IFC ---------- 41
2.2.3.2 Modélisation d'un bâtiment au moyen des IFC ---------- 42
2.2.4 CityGML ---------- 44
2.2.5 IndoorGML ---------- 46
2.2.6 Pertinence des standards pour la planification automatique de chemin 47
2.3 La planification de chemin intérieur ---------- 50
2.3.1 Représentation de l'environnement intérieur ---------- 50
2.3.1.1 Décomposition cellulaire ---------- 51
2.3.1.2 Méthode de graphe ou RoadMap ---------- 52

2.3.2 Algorithmes de recherche du plus court chemin ----------54
2.3.2.1 Algorithme de Dijkstra ----------54
2.3.2.2 Algorithme de A * ----------55
2.3.3 Représentation d'un navigant dans la planification de chemin -----56
2.4 Planification du chemin basée sur un BIM ----------58
2.4.1 Vérification d'évacuation ----------59
2.4.2 Aide aux visiteurs----------59
2.4.3 Aide aux secouristes----------63
2.4.4 Aide aux opérateurs de maintenance ----------67
2.4.5 Évaluation des approches ----------68
3.5 Conclusion----------70

Chapitre 3 : Proposition de recherche BiMov---------- 71

3.1 Introduction----------71
3.2 Architecture du système BiMov----------72
3.3 Analyse d'exigence du système BiMov ----------73
3.3.1 Les cas d'utilisation du système BiMov ----------73
3.3.1.1 Point de vue utilisateur ----------74
3.3.1.4 Point de vue des gestionnaires ----------75
3.3.2 Diagramme de classe de BiMov ----------76
3.4 Modèles de données de BiMOV----------77
3.4.1 Modèle de bâtiment----------78
3.4.2 Modèle de navigant ----------82
3.4.3 Modèle de calendrier ----------85
3.4.4 Modèles de graphes----------86
3.5 Construction des graphes ----------88
3.5.1 Explicitation des relations de voisinage entre espaces ----------88
3.5.2 Construction des graphes Macro et Externe----------90
3.5.3 Construction de graphe Interne----------90
3.6 Restriction de la navigation selon le navigant----------91
3.6.1 Traitement géométrique ----------92
3.6.2 Traitement sémantique----------93
3.7 Prise en compte de l'état des espaces et transitions ----------94
3.7.1 Cadre général : départ immédiat et états stables ----------94
3.7.2 Cas particuliers de départ planifié en situation instable ----------95
3.8 Génération de chemin ----------96
3.9 Conclusion----------99

Chapitre 4 : Implémentation du système BiMov ---------- 103

4.1 Introduction---------- 103
4.2 Environnement de développement de BiMov---------- 104
4.3 Exploitation du modèle IFC ---------- 105
4.3.1 Exemple de modèle IFC ---------- 107
4. 3.2 Explicitation de la notion de voisinage entre espaces ---------- 108
4.3.2.1 Voisinage horizontal---------- 108
4.3.2.2 Voisinage vertical ---------- 110
4.4 Développement de la plateforme des gestionnaires---------- 113
4.4.1 Gestion des modèles de navigants ---------- 113
4.4.2 Gestion des modèles de calendriers ---------- 116
4.5 Développement des algorithmes ---------- 118
4.5.1 Extraction des données du modèle IFC ---------- 118
4.5.2 Construction des graphes ---------- 121
4.5.3 Réduction des graphes---------- 123
4.5.3.1 Réduction du graphe Externe ---------- 123
4.5.3.2 Réduction du graphe Interne ---------- 124
4.6 IHM dédiée à l'exploitation de BiMov par le navigant---------- 126
4.7 Conclusion---------- 127

Chapitre 5 : Cas d'études---------- 129
5.1 Introduction---------- 129
5.2 Préparation des données---------- 129
5.2.1 Modèles de bâtiments utilisés comme cas d'études ---------- 129
5.2.2 Profils de navigants---------- 131
5.3 Scénarios de planification de chemin ---------- 132
5.3.1 Au niveau Macro ---------- 132
5.3.2 Au niveau Externe---------- 134
5.3.3 Au niveau Interne ---------- 138
5.4 Conclusion---------- 140

Conclusion et perspectives ---------- 143

Liste des références ---------- 149

Liste des figures :

Figure 1 : Encombrement physique incompatible avec la navigation ---------- 24
Figure 2 : Prise en compte de la conjoncture dans la planification de chemin ---------- 25
Figure 3 : Composants de base d'un système de navigation (Union, 2012) ---------- 27
Figure 4 : Constituants d'un système de navigation intérieure ---------- 28
Figure 5 : Exemple d'application de Maps People (Russo, 2013) ---------- 29
Figure 6 : Technologies de localisation intérieure/extérieure (selon *infsoft.com*). ---------- 30
Figure 7 : Exemple d'un plan de circulation au sein d'un centre commercial ---------- 32
Figure 8 : Planification de chemin pour secouristes (Cavanaugh et al., 2010) ---------- 33
Figure 9 : Objectifs de la thèse ---------- 34
Figure 10 : Plan 2D d'un étage ---------- 38
Figure 11 : Architecture IFC4 ---------- 41
Figure 12 : Structure d'un bâtiment défini en IFC ---------- 42
Figure 13 : Liste d'IfcBuildingElement (buildingSMART, 2013) ---------- 43
Figure 14 : IfcRelSpaceBoundary(BuildingSmart, 2013) ---------- 44
Figure 15 : Les 5 niveaux de détail de CityGML (Gröger and Plümer, 2012) ---------- 45
Figure 16 : Diagramme UML d'un modèle de bâtiment en CityGML. Le rectangle rouge fait référence aux classes en relation avec la planification de chemin (Gröger and Plümer, 2012). ------ 46
Figure 17 : Multi-représentation d'espaces dans IndoorGML ("IndoorGML OGC," n.d.) ---------- 47
Figure 18 : Graphe d'accessibilité dérivé des pièces adjacentes. ---------- 48
Figure 19 : décomposition cellulaire approchée ---------- 51
Figure 20 : A gauche les obstacles insurmontables (un personne ne peut pas : (a)grimper, (b) traverser et (c) passer à travers) ; à droite les obstacles surmontables (Bandi and Thalmann, 1998). 52
Figure 21 : Exemple de graphe de visibilité ---------- 53
Figure 22 : Exemple de diagramme de Voronoi généralisé ---------- 53
Figure 23 : Graphe hiérarchique d'un bâtiment (Stoffel, 2009). ---------- 54
Figure 24 : Navigant représenté par son cylindre englobant (Kuffner, 1998) ---------- 56
Figure 25 : Module de navigation dans le logiciel Unity (les zones en bleu sont navigables) -------- 57
Figure 26 : Principe de la Méthode MinKowski sums ---------- 57
Figure 27 : Processus InSightBIM-Regulation (Choi et al., 2014) ---------- 59
Figure 28 : Algorithme de planification de circulation basé sur un modèle IFC (Lin et al., 2013) --- 60
Figure 29 : (A) Chemin le plus court avec FMM traditionnel; (B) Chemin le plus court avec FMM amélioré (Lin et al., 2013) ---------- 61

Figure 30 : Centerline network généré à partir d'un BIM ---------- 62

Figure 31 : Graphe de circulation à l'intérieur d'un espace selon le nombre de portes et d'accès verticaux (Lee et al., 2010) ---------- 63

Figure 32 : Schéma de classes de BO-IDM (Isikdag et al., 2013) ---------- 64

Figure 33 : Planification d'intervention d'urgence avec IESM (Tashakkori et al., 2015) ---------- 65

Figure 34 : Réseau de navigation intérieure connecté au réseau routier dans IESM ---------- 65

Figure 35 : Tessellation d'un grand espace ouvert (a) Tessellation sans seuil de longueur maximale de liaison entre les cellules ; (b) Tessellation avec seuil de longueur maximale de liaison de 6 m (Boguslawski et al., 2016) ---------- 66

Figure 36 : Modèle de graphe de MGNM ---------- 67

Figure 37 : Configuration expérimentale pour les tests de navigation et de maintenance (a) détecteur de fumée ; (b) carte de navigation de l'étage. ---------- 67

Figure 38 : Workflow du système BiMov ---------- 73

Figure 39 : Cas d'utilisations du point de vue des navigants ---------- 75

Figure 40 : Cas d'utilisations du point de vue des gestionnaires ---------- 75

Figure 41 : Diagramme de classes de BiMov ---------- 77

Figure 42 : Les modèles de données de BiMov ---------- 78

Figure 43 : Modèle de bâtiment de BiMov ---------- 79

Figure 44 : Manutention d'équipement intérieur et transport encombrant ---------- 82

Figure 45 : Largeur balayée lors d'un lacet ---------- 84

Figure 46 : Modèle de calendrier ---------- 85

Figure 47 : Modèle de graphe de niveau 1 : Macro ---------- 86

Figure 48 : Modèle de graphe de niveau 2 : Externe ---------- 87

Figure 49 : Modèle de graphe de niveau 3 : Interne ---------- 88

Figure 50 : Voisinage horizontal ---------- 89

Figure 51 : Principe de détection de nœuds voisins dans le maillage ---------- 91

Figure 52 : Création de zone tampon autour des obstacles ---------- 93

Figure 53 : Options plus ou moins précises de vérification de l'état d'accessibilité des nœuds ------ 96

Figure 54 : Prise en compte de l'aptitude à la rotation du navigant ---------- 98

Figure 55 : Vue d'ensemble du prototype BiMov ---------- 105

Figure 56 : Correspondances entre les classes de BiMov et les entités du modèle IFC ---------- 106

Figure 57 : Exemple de fichier IFC chargé dans BIMVision ---------- 107

Figure 58 : Exemple d'en-tête de ficher IFC ---------- 107

Figure 59 : Extrait de la section data d'un modèle IFC de maison ---------- 108

Figure 60 : Exemple de paramètres d'une entité IFC (un mur: IfcWallStandardCase) ---------- 108
Figure 61 : Cas d'une porte et d'une fenêtre ---------- 109
Figure 62 : Cas d'une ouverture ---------- 110
Figure 63 : Cas d'un escalier ---------- 111
Figure 64 : Cas d'un ascenseur ---------- 112
Figure 65: Cas d'une rampe ---------- 112
Figure 66 : Page d'accueil de la plateforme gestionnaire ---------- 113
Figure 67 : Structure de données de quelques navigants sous Excel ---------- 114
Figure 68 : Fenêtre IHM de gestion des navigants ---------- 115
Figure 69 : Déroulement des différents scénarios ---------- 115
Figure 70 : Création d'un calendrier vierge ---------- 116
Figure 71 : Modalités de gestion du calendrier d'un bâtiment ---------- 117
Figure 72 : Création d'un événement de calendrier ---------- 118
Figure 73 : Interface Utilisateur ---------- 127
Figure 74 : Modèle *AC-11-Smiley-West-04-07-2007.ifc* ---------- 130
Figure 75 : Modèle *conference-centre.ifc* ---------- 130
Figure 76 : Modèle 0319EngineeringBuilding.ifc ---------- 131
Figure 77 : Graphe Macro « Modèle 1 » ---------- 132
Figure 78 : Graphe Macro « modèle 2 » ---------- 133
Figure 79 : Visualisation des défauts de conception dans le modèle 2 ---------- 134
Figure 80 : Chemin proposé à un visiteur sans perturbation ---------- 135
Figure 81 : Chemin proposé à l'agent de maintenance ---------- 135
Figure 82 : Absence de chemin pour un profil de transpalette en l'absence d'ascenseur ---------- 136
Figure 83 : Chemin du transpalette après la création de l'ascenseur ---------- 136
Figure 84 : Chemin proposé à un visiteur à 12:00 ---------- 137
Figure 85 : Chemin proposé à un visiteur à 13:00 ---------- 138
Figure 86 : Chemin optimal consigné en format texte ---------- 138
Figure 87 : Analyse de l'intérieur pour le profil « visiteur » ---------- 139
Figure 88 : Analyse de l'intérieur pour le profil « drone » ---------- 140
Figure 89 : Cas d'un espace entourant un patio ---------- 145
Figure 90 : Cas d'un grand espace intérieur avec points d'intérêt (POI) ---------- 146
Figure 91 : Planification de chemins intérieurs via l'extérieur ---------- 146

Introduction générale

Selon une étude récente du NHAPS (National Human Activity Pattern Survey), plus de la moitié de la population mondiale vit aujourd'hui dans des zones urbaines et passe plus que 90 % de son temps à l'intérieur de bâtiments (ONU, 2014 ; Roberts, 2016), que ce soit pour travailler, y habiter, se procurer des produits ou des services, répondre à une invitation ou une convocation, ou simplement se promener. La concentration urbaine induit d'autre part, notamment dans les cœurs de villes, une interconnexion de plus en plus complexe entre des bâtiments toujours plus gigantesques, tels que les centres commerciaux, les hôpitaux, les gares, les aéroports, qui se caractérisent par de nombreux espaces (halls, commerces, bureaux, salles techniques…), différents types de transitions entre ces espaces (portes, escaliers, ascenseurs, rampes…), la présence éventuelle de zones d'accès restreint, et une certaine variabilité des conditions d'accessibilité. Il en découle un besoin accru de planification dynamique de chemin, à l'intérieur des bâtiments toujours plus complexes (Liu, 2017). Cette complexité pose de nombreux défis aux gestionnaires des bâtiments, aux occupants réguliers des espaces, aux opérateurs de maintenance occasionnels et plus encore, aux visiteurs qui découvrent ces bâtiments pour la première fois. Ces constats rendent souhaitable la mise à disposition de moyens de planification automatique de chemin intérieur, afin de faciliter la mobilité à l'intérieur des bâtiments.

La planification de chemin intérieur consiste à identifier, préalablement à un déplacement, le « meilleur » itinéraire pour un navigant (humain, personne à mobilité réduite, robot ou tout artefact mobile), évitant les collisions avec des obstacles fixes (murs, poteaux, équipements) ou dont la localisation ou l'état soit susceptible de changer dans le temps (mobilier, cloison mobile, zone de travaux). Pour envisager une planification automatique de chemin intérieur, il faut pouvoir disposer d'un modèle du bâtiment qui identifie les constituants physiques de l'intérieur du bâtiment, comme murs, dalles, escaliers, portes, équipements... Il faut aussi pouvoir interpréter ces constituants selon leur nature (analyse sémantique), leurs dimensions (analyse géométrique), leur organisation (analyse topologique) et en déduire des possibilités ou non de déplacements élémentaires, dont la concaténation formera potentiellement un chemin d'un point à un autre. Un raisonnement global sur l'ensemble des chemins possibles devrait enfin permettre de trouver le « meilleur » chemin selon différents critères, tels que la distance, le temps, le coût, la pénibilité... Un système de planification intelligent devrait prendre en compte la nature et la taille du navigant, ses préférences, ses aptitudes au déplacement, ainsi que l'état conjoncturel d'accessibilité des espaces et transitions du bâtiment.

Originalité de la thèse

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons de spécifier un système d'aide à la planification automatique de chemin intérieur, basé sur un modèle standard de bâtiment, prenant en compte le profil du navigant et la dynamique de l'état des espaces et transitions. Les contributions visées sont les suivantes :

- **Définition d'un modèle de bâtiment adapté à la planification de chemin** : nous proposerons un modèle de bâtiment qui explicite la nature et l'organisation des constituants physiques d'un bâtiment, déterminants pour la planification de chemin, tels que les espaces intérieurs, les transitions horizontales (portes, ouvertures, fenêtres…), les transitions verticales (escaliers, ascenseurs, rampes…), ainsi que les obstacles à considérer (murs, colonnes, meubles ou équipements, encombrants ou dangereux) (Hamieh et al., 2015).
- **Proposition d'un graphe de navigation structuré sur 3 niveaux de détail :** nous proposerons d'organiser l'ensemble des déplacements élémentaires possibles sous forme de graphes, selon 3 niveaux de détail : Macro, Externe et Interne. Le graphe Macro explicite la représentation topologique du bâtiment ; ce niveau permet aux architectes, lors de la conception du bâtiment, de vérifier l'accessibilité de tous les espaces. Le graphe Externe explicite les chemins possibles entre les espaces, permettant d'éviter les obstacles structurels que représentent notamment les murs et le mobilier ou les équipements structurels (Hamieh et al., 2016, 2015).
- **Proposition d'un modèle original de navigant** : nous proposerons un modèle de navigant destiné à caractériser, du point de vue de la navigation intérieure, explicitant notamment son encombrement, ses aptitudes et limites physiques et organisationnelles à se déplacer. Ce modèle est destiné à rendre possible l'automatisation de vérifications géométriques et sémantiques associées à chaque profil de navigant lors de la recherche des possibilités de déplacements dans le bâtiment (Hamieh et al., 2017).
- **Proposition d'un modèle dynamique des états** : pour prendre en compte la variabilité de l'accessibilité des espaces et transitions du bâtiment, nous proposerons enfin de confronter la recherche conjoncturelle de chemin à un calendrier de l'état d'accessibilité des espaces et des transitions empruntables.

L'ensemble des propositions a fait l'objet d'un prototypage informatique. Le système développé, intitulé BiMov exploite en entrée un modèle BIM au format IFC, qui représente le bâtiment de manière standardisée. Il propose automatiquement en sortie le « meilleur » chemin trouvé, pour un profil de navigant donné, en fonction d'un calendrier d'états des espaces et transitions.

Organisation du mémoire

Le mémoire comprend 5 chapitres, organisés de la manière suivante :

- Chapitre 1 « La planification de chemin dans les bâtiments complexes » : ce chapitre expose la problématique de planification de chemin extérieur ou intérieur. L'accent est mis sur la planification de chemin intérieur. L'intérêt et les défis de la planification de chemin intérieur sont précisés, ce qui permet de faire émerger la problématique de recherche de notre travail.
- Chapitre 2 « État de l'art » : ce chapitre comprend 3 parties. La première partie détaille quelques modèles d'actualité permettant de représenter l'intérieur d'un bâtiment en véhiculant des d'informations sémantiques, géométriques et topologiques pertinentes pour étudier la planification de chemin. La deuxième partie se focalise sur les modèles de données utilisés pour la recherche de chemin, les méthodes développées pour représenter un navigant dans un processus de planification de chemin et les algorithmes développés pour la recherche d'un chemin optimal. La dernière partie étudie les performances et insuffisances des différentes approches scientifiques récemment suivies par les chercheurs qui ont tenté d'aborder cette problématique sur la base d'un modèle BIM.
- Chapitre 3 « Proposition de recherche » : Ce chapitre décrit d'abord l'architecture générale du système BiMov, puis détaille les différents modèles originaux qui le constituent le cœur de notre contribution à cette problématique de recherche.
- Chapitre 4 « Implémentation » : ce chapitre décrit le prototype informatique qui a été développé pour démontrer que notre proposition théorique était réalisable avec les technologies actuelles. Une première partie détaille le processus d'analyse d'un BIM standard. Une deuxième partie décrit la structure de données qui met en œuvre les modèles de navigant, de calendrier, de graphes, ainsi que l'interface hommes-machines (IHM) destinée aux administrateurs et aux clients du système.
- Chapitre 5 « Cas d'étude » : ce dernier chapitre illustre les modalités d'utilisation du prototype de BiMov, sur la base de scénarios types de recherche de chemin, à différents niveaux de détails, pour différents profils de navigants, dans différentes conditions d'accessibilité des espaces et transitions d'un bâtiment.

Chapitre 1 : La planification de chemin dans les bâtiments complexes

1.1 Introduction à la planification de chemin
- 1.1.1 Intérêt de la planification de chemin
- 1.1.2 Termes connexes à la planification de chemin
- 1.1.3 Critères de sélection d'un chemin

1.2 Comment planifier un chemin ?
- 1.2.1 Exigence pour l'aide à la navigation intérieure
  - 1.2.1.1 Référentiel
  - 1.2.1.2 Technologie de localisation
  - 1.2.1.3 Systèmes de planification de chemin

1.3 Planification de chemin intérieur
- 1.3.1 Intérêt de la planification de chemin dans les bâtiments
- 1.3.2 Défis et problèmes de recherche

1.4 Conclusion

1.1 Introduction à la planification de chemin

1.1.1 Intérêt de la planification de chemin

Aujourd'hui, plus de la moitié de la population, soit 3,5 milliards de personnes, vit dans des zones urbaines. Légèrement inférieur à 30 % en 1950, le taux d'urbanisation a franchi en 2007 le seuil des 50 %. D'après l'Organisation des Nations Unies, il devrait se situer un peu au-dessus de 70 % en 2050 (ONU, 2014). En France, 47,9 millions de personnes, soit 77,5 % de la population, habitent en ville, selon l'Insee (Institut National de la Statistique et des Études Economiques). Pour (Clanché and Rascol, 2011), cette croissance conduit à l'augmentation concomitante du nombre de grandes villes. Face à la concentration de population dans les villes, il devient nécessaire de rendre les villes plus intelligentes pour répondre aux besoins croissants de mobilité et d'accès aux ressources et services dont les populations urbaines ont besoin.

La mobilité intelligente est l'un des défis majeurs dans le concept de ville intelligente, parce qu'il faut intégrer plusieurs moyens de transport (rail, automobile, bicyclette, parcours piéton) en un seul système qui soit à la fois efficace, facilement accessible, abordable, sûr et écologique (Breux and Diaz, 2017).

La France est actuellement l'un des pays les plus mobilisés sur la question du réchauffement climatique, du développement durable et de la gestion rationnelle des énergies. Dans ce cadre, Madame Élisabeth Borne, ministre chargée du Transport, a lancé le 19 septembre 2017 les *assises de la mobilité*, qui s'adressent à tous les ac-

teurs du territoire pour préparer la Loi d'Orientation des Mobilités (« Assises nationales de la mobilité, » 2017). Elle affirmait alors que : « *la mobilité est en train de se transformer profondément. Chacun peut en faire le constat au quotidien. On ne se déplace déjà plus aujourd'hui comme on le faisait hier, et que dire de demain ? En l'espace de quelques années, les offres et les prix se sont diversifiés, le numérique est venu bousculer les pratiques, et la transition écologique nous invite à repenser nos habitudes. Les besoins fondamentaux eux, n'ont pas changé. Il faut tous les jours nous déplacer, pour travailler, pour étudier, nous soigner et nous divertir…* ». Les assises de la mobilité sont structurées en six grands thèmes : (1) mobilité plus propre (réduire notre empreinte environnementale) ; (2) mobilités plus connectées (accélérer l'innovation et la révolution numérique) ; (3) mobilités plus solidaires (réduire les fractures sociales et territoires) ; (4) mobilités plus intermodales (mieux articuler toutes les offres de transport) ; (5) mobilités plus sûres (réduire les accidents et les risques) ; (6) mobilités plus soutenables (revoir les modèles économiques et la gouvernance). Nos travaux sont particulièrement influencés par le 2^{e}, 4^{e}, 5^{e} et 6^{e} thème.

La planification de chemin est un problème de recherche qui s'intègre dans le contexte global de la mobilité. Planifier son chemin permet de gagner du temps et de minimiser le stress lié à un déplacement, notamment dans un environnement inconnu. Il permet aussi de choisir le meilleur itinéraire c'est-à-dire, selon des critères à définir, d'identifier le chemin le plus court, le plus rapide, le plus économique ou encore le plus sûr (Pu and Zlatanova, 2005). Le choix d'itinéraire dépend de la demande et de la nature de l'agent mobile ou navigant. Un camion qui transporte des matières dangereuses, par exemple, peut choisir l'itinéraire le plus sûr afin d'éviter les accidents et les situations à risque. Planifier un chemin permet aussi de choisir le bon moment de départ afin d'éviter les embouteillages, problème majeur dans les grandes villes.

1.1.2 Termes connexes à la planification de chemin

La planification de chemin est un problème de recherche qui a été abordé par plusieurs domaines, tels que la robotique mobile (Khatib, 1986) afin de trouver un chemin pour un robot devant se déplacer dans des environnements statiques ou dynamiques. Il se pose aussi pour étudier le déplacement d'un bras mécanique industriel possédant de nombreux degrés de liberté et étant placé dans un environnement très encombré (Rusu, 2014). Dans le domaine florissant des jeux vidéo (Yan et al., 2011), il consiste à chercher un chemin, pour un agent virtuel, dans un environnement virtuel. Il intéresse la logistique (Sallez et al., 2016), dans de nombreuses situations de navigation intérieure et extérieure (Buchel and Gilliéron, 2004). Compte tenu de la grande variété de problèmes abordés, la planification de chemin a fait l'objet de nombreuses propositions de recherche durant ces dernières décennies. De nombreux résultats sont identifiés et discutés dans les états de l'art de (Choset, 2005 ; Latombe

et al., 1991 ; LaValle, 2006). Ainsi, plusieurs définitions ont été relevées, permettant de caractériser le problème de planification de chemin.

En robotique, selon (Lopez, 2012), la problématique de planification de chemin est définie par *: « étant donné un robot possédant un nombre variable de degrés de liberté, et une description de l'environnement où ce robot est immergé, comment trouver un chemin libre de toute collision entre deux configurations du robot au sein de l'environnement* ? ». Une autre définition est donnée par (Shiller, 2015) « *la planification de chemin représente une séquence de positions, définie dans l'espace de configuration du robot, que le robot peut atteindre* ». (Copot et al., 2016) estiment que « *La planification de chemin ou la planification de trajectoire est une partie essentielle de la navigation de l'agent mobile ; elle doit déterminer un chemin sans collision entre un point de départ et un point de destination* ». En psychologie, « *la planification exige de l'agent humain de tracer un chemin entre A et B dans un espace de modalisation sans avoir à se heurter au monde réel* » (Sahli, 2006). D'après (Noreen et al., 2016) « *Le terme de planification de chemin se réfère à trouver un chemin sans collisions avec un coût optimal ou presque optimal. Compte tenu des différentes applications et des contraintes de l'agent mobile, les critères optimaux pourraient être sur une ou plusieurs conditions telles que la distance physique, les risques, la consommation d'énergie, la souplesse* ».

Concernant la mobilité intérieure, « *la planification de chemin se réfère généralement à trouver le chemin le plus court entre deux points à l'intérieur des bâtiments, tout en évitant les collisions avec les obstacles* » (Lin et al., 2013). (Stoffel, 2009) ajoute que « *les systèmes de planification de chemin nous aident à trouver notre chemin entre deux configurations A et B. Les connaissances spatiales contenues dans ces cartes numériques sont particulièrement utiles pour se déplacer dans les nouveaux environnements* ».

En synthèse, la problématique se ramène donc à trouver, entre un point de départ et un point d'arrivée définis dans un même référentiel, un chemin sans collisions avec les obstacles, adapté aux aptitudes de mouvement d'une personne ou d'un objet mobile que nous désignerons par le terme **navigant**. Les points suivants illustrent les termes en relation avec la planification de chemin que nous utiliserons dans la suite de ce manuscrit.

- **Chemin**

Plusieurs synonymes peuvent être associés au mot « chemin » comme : voie, route, passage, sentier, itinéraire, trajet, rue, boulevard, avenue, corridor, etc. La définition juridique de chemin est différente entre les pays. En Belgique, le code forestier Wallon définit le chemin comme « voie ouverte à la circulation du public, en terre ou empierrée, plus large qu'un sentier, qui n'est pas aménagée pour la circulation des véhicules en général » (« Code forestier Wallon, » 2008). En France, selon l'IGN (Institut Géographique National), les chemins sont « prévus pour la circulation d'engins d'exploitation » et les sentiers sont « des chemins étroits ne permettant pas le passage de véhicules ». Dans le domaine de la cartographie, parmi les classes ou types d'un système d'information géographique, la rubrique chemin rassemble les « chemins empierrés », « chemins », « sentiers », « escaliers » et « pistes cyclables ».

Nous retiendrons comme définition, pour le concept de chemin : *« une voie de circulation pour toute personne ou objet mobile ».*

- **Navigant**

La planification de chemin dépend du profil du navigant, c'est-à-dire de l'objet ou de personne plus ou moins mobiles, client de ce service. Voici quelques exemples de navigants qui, dans un même environnement, n'utiliseront vraisemblablement pas le même chemin :

- Les personnes à mobilité réduite (en fauteuil roulant ou mal voyants) planifient leur chemin afin d'atteindre leur destination de manière autonome avec un minimum d'effort et de risque (Han et al., 2002; Hsieh and Kim, 2010).
- Les ouvriers planifient leur chemin dans un chantier de construction afin de circuler en toute sécurité sur le site, d'autant plus que l'origine des accidents de chantier provient majoritairement de voies de circulation mal identifiées (Soltani et al., 2002; Soltani and Fernando, 2004).
- Les premiers secours planifient leur chemin pour arriver sur le lieu d'interventions le plus vite possible et pour découvrir l'entourage du lieu d'intervention afin de localiser les sources d'eau en cas d'incendie (Sahli, 2006; Wang and Zlatanova, 2016).
- Les opérateurs de maintenance qui interviennent pour la première fois dans un endroit inconnu et complexe (comme une usine) doivent planifier leur chemin pour accéder aux équipements recherchés (Bellini et al., 2014),
- Les personnels sont en général soumis, pour leurs déplacements au sein des usines, à des contraintes de circulation visant à limiter les risques de collisions, tout en fluidifiant le trafic interne à l'entreprise (« INRS-Le guide de la circulation en entreprise, » 2010). Les contraintes sont d'autant plus fortes que les environnements

à parcourir sont confinés et dangereux, comme dans le cas d'installations nucléaires (Wang and Cai, 2018),

- Les engins se déplacent au sein de bâtiments industriels, d'entrepôts ou les zones d'expéditions et de livraisons, en respectant des règles de sécurité telles que la largeur de voie de circulation, la pente maximale, l'éloignement des obstacles et des autres voies de circulation dédiées aux piétons, etc. (« INRS-Le guide de la circulation en entreprise, » 2010),
- Le transport d'objets encombrants induit d'autres contraintes spécifiques (Liu and Zlatanova, 2015). L'histoire la plus connue dans ce domaine est le paradigme de déménageur de piano qui a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche (Schwartz and Sharir, 1983),
- Un robot qui se déplace dans un environnement statique ou dynamique doit adapter son plan de déplacement à sa perception de l'environnement (Duchoň et al., 2014),
- Dans une chaîne logistique, on planifie le chemin d'un AGV (Automatic Guided Vehicle), pour la gestion autonome d'un magasin ou pour un transfert automatique d'un zone de stockage vers la zone d'expédition (Beinschob et al., 2017; Iñigo and Alley, 1991),
- Les véhicules autonomes doivent planifier leur chemin pour pouvoir circuler de manière autonome et en toute sécurité pour les autres véhicules, piétons, cyclistes (Paden et al., 2016).

La planification de chemin concerne toute personne ou objet devant se déplacer ou être déplacé. La plupart du temps, il s'agit de déplacement au sol. Mais la planification de chemin concerne aussi la navigation aérienne, comme les hélicoptères, les aéronefs ou encore les drones (Copot et al., 2016 ; Montoya et al., 2010).

Dans ce mémoire, nous utiliserons le mot « navigant » pour représenter les personnes ou les objets mobiles (engins, voitures, bicyclettes, moto, etc.) pour lesquels une planification de chemin est requise.

- **Référentiel**

La planification de chemin d'un navigant entre un point A et un point B requiert que A et B soient considérés dans un même référentiel. Ce référentiel peut être l'environnement lui-même, si le navigant est doté des capacités cognitives suffisantes pour l'appréhender. Sinon, le référentiel sera un modèle de l'environnement (par exemple, une carte), qui devra détenir les informations géométriques nécessaires à la localisation de A et de B, ainsi que des possibilités de déplacement entre A et B. Le modèle d'un environnement extérieur destiné à être parcouru par un véhicule devra nécessairement détenir des informations sur la localisation de points d'intérêt localisés dans le référentiel, sur le réseau de routes desservant ces points d'intérêt, sur

les intersections entre les éléments de ce réseau, sur les sens de circulation et éventuellement les limitations de vitesse (Afyouni et al., 2012 ; Stoffel, 2009). Le modèle d'un environnement intérieur devra détenir des informations sur les espaces du bâtiment (points d'intérêt localisés), les passages (absence d'obstacle) ménagés entre ces espaces, permettant ainsi de passer de l'un à l'autre, que nous désignerons par le terme **transition**.

1.1. 3 Critères de sélection d'un chemin

Pour déterminer si un chemin représenté dans le référentiel est pertinent ou non pour un navigant donné, plusieurs critères sont à considérer :

- La prise en compte **du profil de navigant** est déterminante lors de la planification de chemin. **L'encombrement physique** du navigant, **ses aptitudes** au déplacement ainsi que **ses limites** (Ali et al., 2016 ; Zlatanova et al., 2008) le prédisposent ou pas à emprunter un chemin. En navigation extérieure, les autoroutes sont interdites à la circulation de cyclistes et des piétons ; les rues étroites sont interdites aux poids lourds.

Figure 1 : Encombrement physique incompatible avec la navigation

- En navigation intérieure, une personne en fauteuil roulant ne pourra pas emprunter un escalier, mais pourra emprunter un ascenseur ou encore une rampe, à condition toutefois que sa pente n'excède pas un seuil réglementé (Han et al., 2002).
- Chemin optimal : entre plusieurs alternatives, plusieurs critères pourront être retenus pour déterminer de choix du chemin. Ce peut-être le **plus court** en distance, le

plus rapide en temps, le plus **confortable**, le plus **sécuritaire** (évitant les zones dangereuses), le **moins coûteux** en énergie (Dudas et al., 2009),...

- La prise en compte de **la conjoncture de circulation** est un critère important à prendre en compte pour planifier un chemin (Afyouni et al., 2012). En effet, les environnements extérieurs peuvent subir des changements temporaires en raison de travaux ou de congestion de trafic. Des travaux de réfection de chaussée nécessitent parfois de bloquer la circulation de certaines routes, obligeant les usagers à emprunter un autre chemin. Les conditions météorologiques peuvent avoir une influence significative sur la vitesse de circulation d'un navigant (Figure 2).

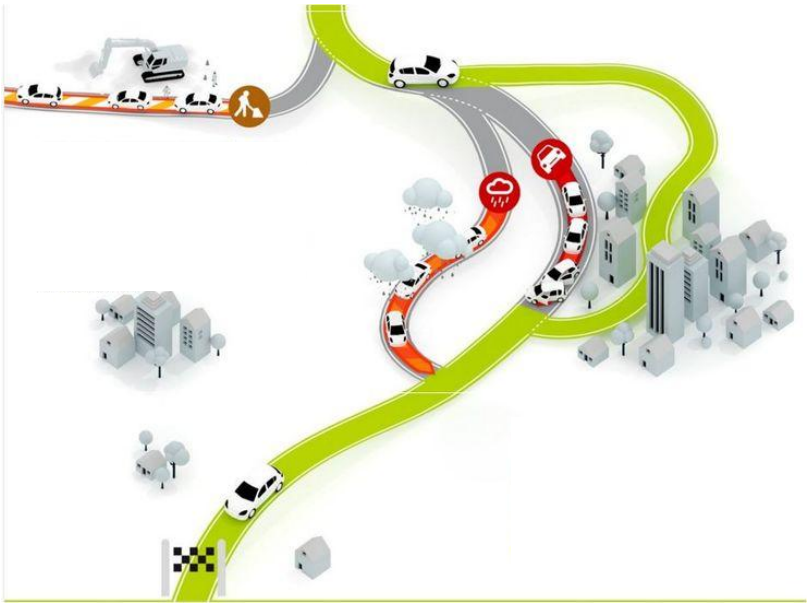


Figure 2 : Prise en compte de la conjoncture dans la planification de chemin

- De même, les environnements intérieurs peuvent être soumis à des travaux de maintenance ou des changements des conditions d'exploitation (Zlatanova et al., 2008). La prise en compte de changements temporaires des conditions de circulation intérieure est donc un critère à prendre en compte pour la planification de chemin intérieur (Mioc et al., 2008).
- **Le coût de calcul** : dans une moindre mesure, la vitesse de calcul nécessaire pour planifier un chemin et le coût de stockage des résultats du système de planification de chemin peuvent aussi constituer un critère (Pu and Zlatanova, 2005). Nous ne retiendrons toutefois pas ce critère comme déterminant, dans la mesure où nous ne plaçons pas notre réflexion dans un cadre a priori contraint par les technologies.

1.2 Comment planifier son chemin ?

La carte et la boussole ont longtemps été les accessoires indispensables du navigateur ou du randonneur pour se déplacer dans la nature et découvrir le monde. Connaître sa position a toujours été une préoccupation de l'homme qui a développé, au fils du

temps, les moyens nécessaires pour s'orienter et se déplacer au bon endroit (Boumenir, 2011; Gillieron and Ladetto, 2002).

L'histoire moderne de ITS (Intelligent Transport Systems) dans les services de navigation remonte au début des années 60, lorsque l'association fédérale des autoroutes des États-Unis a élaboré le système ERGS (Electronic Route Guidance System), qui visait à guider les véhicules routiers. Il était composé de dispositifs embarqués et de balises installées sur le bord des routes (Rosen et al., 1970). Un système japonais concurrent a été développé à la fin des années 70, nommé Comprehensive Automobile Traffic Control System (CACS). Ce système comprenait la détection de mouvement des véhicules, l'équipement sur le bord de la route et une unité centrale de traitement des données (Totani, 1980). Quelques années plus tard, deux systèmes européens, similaires à ERGS et CACS ont été développés : l'AutoGuide au Royaume-Uni et l'Ali-Scout en Allemagne (Tomkewitsch, 1991).

La démocratisation de la technologie de positionnement par satellite (GPS) a permis le développement d'une nouvelle génération de systèmes de navigation. Ces systèmes permettent de localiser le navigant ainsi que la cible de son déplacement, pour planifier puis accompagner la navigation routière, aérienne ou maritime. Les systèmes pionniers, tels que TomTom, Garmin, Navman (Zlatanova et al., 2008) sont bien connus du grand public. Les téléphones intelligents ou Smartphones sont dotés de balises GPS et proposent les mêmes services au moyen d'un grand choix d'applications natives ou téléchargeables comme Googlemaps, Waze, HereWeGo, etc. (Boumenir, 2011). Un récepteur GPS peut uniquement indiquer une position approximative (à quelques mètres près), mais il ne connaît ni les routes, ni les lieux, et encore moins les sens de circulation. Le système complet doit donc recourir à des données digitales qui représentent les environnements extérieurs comme les réseaux routiers, les zones de végétations, les bâtiments à proximité des routes, etc. C'est grâce à un modèle de l'environnement (une carte) et à une base de données associée (qui identifie les éléments de la carte, comme les routes ou autoroutes, le temps de parcours estimé sur des tronçons élémentaires), que le système peut planifier un chemin (Gillieron and Ladetto, 2002). La plupart des systèmes peuvent intégrer des informations conjoncturelles en temps réel sur les zones bloquées par des embouteillages, pour suggérer des chemins alternatifs (Zlatanova et al., 2008).

Les composants de base d'un système de navigation moderne, inspiré de ce qui se fait en planification de chemin extérieur, sont illustrés dans la Figure 3. Ils comprennent des technologies de positionnement, un référentiel qui représente l'environnement, un système de planification de chemin et de guidance, une interface (IHM) pour communiquer avec le système, ainsi que des informations dynamiques sur l'état du trafic qui sont transmises par WiFi ou ondes radio. (Union, 2012).

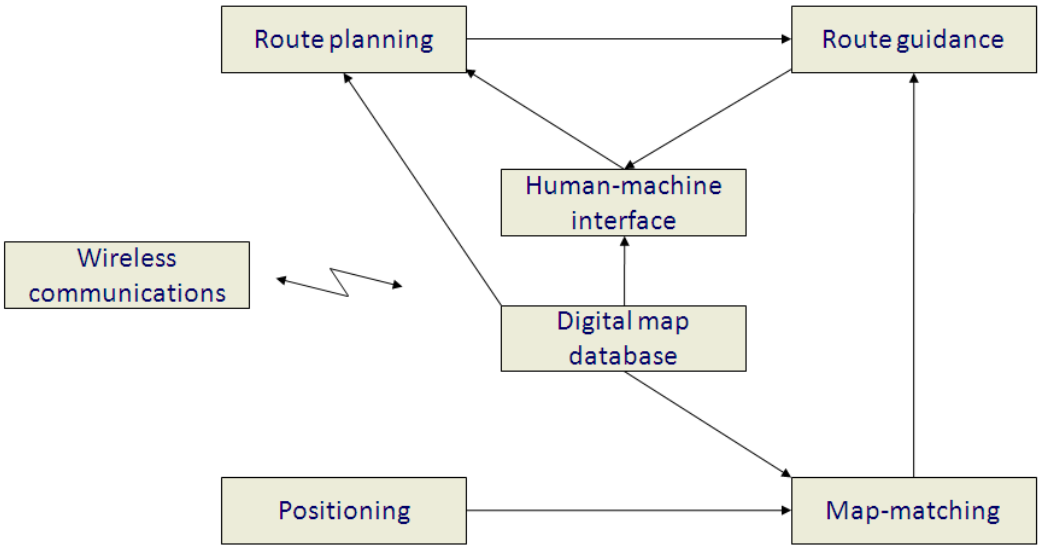


Figure 3 : Composants de base d'un système de navigation (Union, 2012)

Si le recours aux outils de planification de chemin extérieur est bien ancré dans nos habitudes, la planification de chemin intérieur semble encore balbutiante, en dépit des services qu'elle pourrait apporter aux visiteurs, aux travailleurs, aux secouristes en cas d'urgence, etc. Les progrès des systèmes d'information mobiles et les techniques de localisation ont apporté de nouvelles opportunités pour développer des services de navigation intérieure (Stoffel, 2009). Pour (Afyouni, 2013), la navigation intérieure requiert un modèle spatial de l'intérieur des bâtiments, tout comme la navigation extérieure requiert un modèle numérique de l'environnement, et deux contextes génériques émergent (Figure 4) :

- Le contexte d'utilisation « context of use » qui comprend toutes les caractéristiques qui peuplent l'environnement intérieur tel que le profil de l'utilisateur (ses préférences, ses capacités physiques et cognitives), les points d'intérêt pour l'utilisateur, leur localisation, ainsi que l'interface de l'utilisateur qui fournit une interaction directe avec le système (manipulation des données d'entrée, opérations de communication des données de sortie),
- Le contexte d'exécution « Context of execution » qui modélise et analyse les ensembles des données et comporte : (1) la dimension de l'infrastructure et l'organisation topologique des composants du système ; (2) la dimension du système qui évalue l'utilisation des ressources (mémoire, processus et réseau).

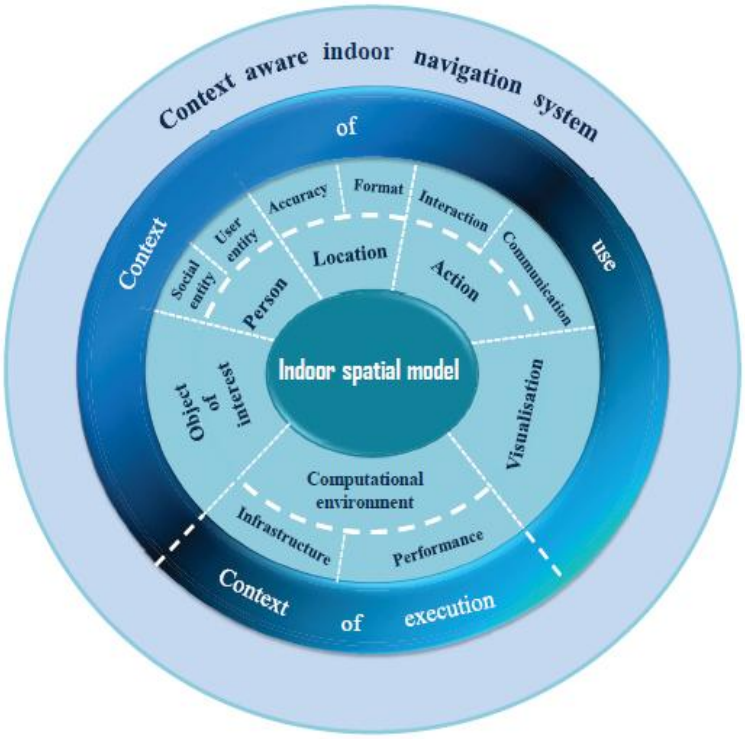


Figure 4 : Constituants d'un système de navigation intérieure

Récemment, quelques systèmes pionniers de navigation intérieure ont vu le jour, comme le projet de Google « Maps people » qui représente une extension de Google Maps vers l'intérieur de bâtiments complexes expérimentaux (Figure 5). Des prototypes ont été appliqués sur l'aéroport et l'université de Copenhague (« Google Maps - MapsPeople, » n.d.). Une start-up lilloise « MapWize » a développé une application pour Smartphones basée sur un plan 2D de bâtiment et sur un système de géolocalisation intérieure (« Mapwize - La solution pour guider les visiteurs à l'intérieur des bâtiments, » n.d.), ou encore le projet allemand InfSoft (*www.infsoft.com*) qui exploite la technologie Bluetooth Beacon. Ces systèmes utilisent tous un fond de carte numérisé statique de l'intérieur du bâtiment.

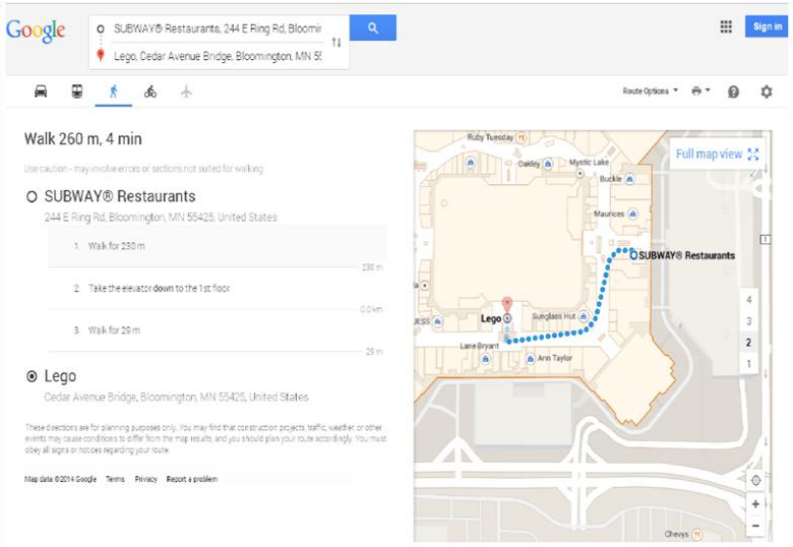


Figure 5 : Exemple d'application de Maps People (Russo, 2013)

1.2.1 Exigences pour l'aide à la navigation intérieure

En général, les systèmes de navigation comprennent : (1) un référentiel qui représente l'environnement; (2) des technologies de localisation pour déterminer l'emplacement du navigant; (3) un système de planification de chemin capable de déterminer le meilleur chemin (souvent le plus rapide, le plus court ou le mon cher) entre un point de départ et un point d'arrivée; (4) une interface de communication.

1.2.1.1 Référentiel

Dans les environnements extérieurs, les référentiels sont généralement des cartes SIG (Système d'Informations Géographiques) associés à des attributs spécifiques pour la navigation comme les réseaux routiers, les passages, le sens, la vitesse limitée, etc. Le réseau routier, ainsi que les surfaces de végétations et les bâtiments qui entourent les réseaux routiers sont préalablement digitalisés, avec une précision qui varie de 5 à 20 m, par des sociétés spécialisées comme Teleatlas, Navtech, etc. (Stoffel, 2009).

Pour les environnements intérieurs, il existe plusieurs modèles susceptibles de représenter l'intérieur des bâtiments, comme le modèle 2D CAD, le modèle BIM (Building Information Modeling), les standards CityGML et IndoorGML (Liu, 2017). Ces modèles fournissent, à des niveaux de détail différents, des informations utiles pour la navigation, telles que l'identification des espaces intérieurs (chambre, séjour, salle de réunion..), les transitions (portes, escaliers, ascenseurs…), les obstacles (murs, poteaux, dalles…).

1.2.1.2 Technologie de localisation

Le système de localisation par satellites est la technologie la plus utilisée pour les systèmes navigation extérieure. Le réseau de satellite le plus connu est le GPS américain, qu'ambitionnent de concurrencer l'alternative européenne beaucoup plus précise Galileo, lancée par l'agence spatiale européenne en mars 2002, ou le GLONASS soviétique, restauré en 2010 (Cheng et al., 2014).

En ce qui concerne les environnements intérieurs, les signaux GPS ne pénètrent pas les murs et sont inutilisables. Pour localiser un navigant, il est en revanche possible de recourir à d'autres technologies telles que WPS (Wifi Positionning system)(Cavanaugh et al., 2010), la RFID (Radio Frequency Identification)(Tsirmpas et al., 2015), la NFC (Near Field Communication), la VLC (Visible Light Communication), Beacon, Ultrason (Basiri et al., 2017; Deak et al., 2012), etc. Ces technologies présentent des caractéristiques différentes du point de vue de la précision, de la portée, du mode de fonctionnement, de l'autonomie (Afyouni, 2013 ; Cheng et al., 2014).

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques de quelques technologies de localisation.

Technology	Indoor/Outdoor	Accuracy	Range	Cross-Platform	Power Supply
GPS		5-20 m	worldwide		
WiFi		5-15 m	< 150 m		
Bluetooth		1-3 m	< 30 m		
VLC		< 50 cm	< 8 m		

Figure 6 : Technologies de localisation intérieure/extérieure (selon *infsoft.com*)

1.2.1.3 Système de planification de chemin

Le système de planification de chemin représente le cœur des systèmes d'aide à la navigation, qu'il s'agisse de navigation intérieure ou extérieure. Il nécessite d'analyser l'environnement réel et de construire un modèle de données approprié capable de représenter le référentiel en un format abstrait, contenant suffisamment d'informations pour planifier le chemin. Deux types de modèle peuvent être distingués, à savoir, le modèle de graphe et le modèle de grille (décomposition en cellule). Les modèles de graphes sont largement utilisés pour la navigation routière, ainsi que

pour la navigation pédestre (Liu, 2017 ; Zlatanova et al., 2008), tandis que les modèles de grilles sont prédominants dans la navigation de robots mobiles (Duchoň et al., 2014). Les deux modèles seront décrits plus en détail dans le chapitre 2. L'exploitation du modèle est exécutée en deux phases (Afyouni, 2013) : une phase statique, qui englobe le processus de sélection multicritères de chemin entre deux points d'intérêts. Ce processus intègre en effet plusieurs critères comme les préférences et les aptitudes du navigant, le temps, la distance, le coût… transmis en tant que paramètres pour évaluer la valeur de chaque tronçon élémentaire et en déduire une combinaison optimale. Une phase dynamique, qui repose sur la localisation récurrente de la position du navigant dans le référentiel et la prise en compte d'évènements ou perturbations survenus depuis la dernière planification, susceptibles d'affecter le chemin prévu (travaux, accidents, changement climatique, etc.).

1.3 Planification de chemin intérieur

1.3.1 Intérêt de la planification de chemin intérieur

Dans les environnements extérieurs, les outils de planification de chemin ont atteint le stade de maturité et sont devenus des produits de masse du marché. Les problèmes de navigation extérieure pour différents types de véhicules, transports en commun (bus, métro, train…), cyclistes, ont été analysés avec beaucoup de détails (Stoffel, 2009).

Compte tenu de la densification urbaine, le problème de planification de chemin se posera de plus en plus à l'intérieur des bâtiments. Avec le développement rapide de l'urbanisation, les bâtiments de travail, d'achalandage ou d'habitation sont de plus en plus reliés, par des passages souterrains ou des passerelles, aux stations de métro et aux stationnements. Ils deviennent de véritables blocs d'espaces clos. Selon le NHAPS (National Human Activity Pattern Survey), les gens passent 90 % de leur temps à l'intérieur de bâtiments (Klepeis et al., 2001 ; Roberts, 2016), que ce soit pour habiter, pour travailler, pour étudier, pour se promener, etc. La complexité des bâtiments pose plusieurs défis pour les gestionnaires, les occupants, les visiteurs et les opérateurs de maintenance dans leurs déplacements à l'intérieur de ces bâtiments.

Aujourd'hui, pour se déplacer à l'intérieur de bâtiments publics de grande taille, les visiteurs peuvent se référer à des plans disposés aux endroits clés, demander leur chemin au comptoir d'accueil s'il existe, puis suivre un plan papier (Figure 7), ou encore parcourir de façon intuitive les couloirs et les étages pour trouver leur destination. Avec ces méthodes classiques, les visiteurs novices perdent beaucoup de

temps pour comprendre le plan de l'établissement, pour se repérer, s'orienter et chercher leurs destinations.

Figure 7 : Exemple d'un plan de circulation au sein d'un centre commercial

L'intérêt de la planification de chemin intérieur n'est pas limité au besoin des seuls visiteurs occasionnels en phase d'exploitation d'un bâtiment. En effet, elle présente un intérêt tout au long du cycle de vie des bâtiments. **En phase de conception**, la planification de chemin permet de vérifier la conformité du bâtiment du point vu de l'accessibilité, c'est-à-dire de vérifier que tous les espaces sont accessibles, qu'il n'existe aucun espace isolé dans le projet, ou bien pour étudier un scénario d'évacuation d'urgence et estimer la durée d'une évacuation, afin de vérifier la conformité de bâtiment à la réglementation en vigueur (Choi et al., 2014). La fourniture d'un plan d'évacuation d'urgence est en effet obligatoire pour tous les ERP (Établissements Recevant du Public) et les bâtiments d'habitation. **En phase de construction**, elle permet de planifier le chemin des ouvriers devant accéder à leur lieu de travail, celui des engins devant pouvoir circuler en toute sécurité sur le chantier (Kang and Miranda, 2006; Soltani et al., 2002), et ce à différents moments de la construction. **En phase d'exploitation**, la planification de chemin peut être utilisée comme support pour les opérateurs de maintenance pour accéder aux équipements à maintenir ou réparer dans des environnements complexes comme des sites industriels (Koch et al., 2014). Elle peut aider les secouristes en cas d'urgence pour appréhender rapidement l'environnement intérieur du bâtiment avant l'intervention (Figure 8), pour estimer l'ampleur du danger et déployer des ressources appropriées aux risques (Cavanaugh et al., 2010 ; Li et al., 2014 ; Tashakkori et al., 2015).

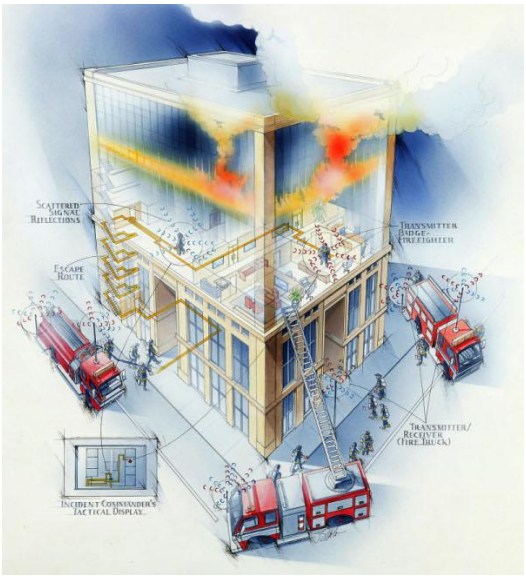


Figure 8 : Planification de chemin pour secouristes (Cavanaugh et al., 2010)

1.3.2 Défi et problème de recherche

Compte tenu des nombreux intérêts et enjeux de l'aide à la navigation intérieure et de l'absence de solution technologique aujourd'hui maîtrisée et démocratisée, nous avons souhaité contribuer à la recherche émergente sur ce sujet. L'une des clés de la réussite des futurs systèmes d'aide à la navigation intérieure est liée à la maturation des technologies de localisation intérieure qui voient le jour actuellement (Afyouni, 2013). L'autre clé de succès est liée à la possibilité d'exploiter automatiquement les modèles BIM de bâtiments existants, dont l'utilisation est en train de se généraliser actuellement, et d'en exploiter toute la richesse sémantique, géométrique et topologique, pour en déduire une planification de chemin optimale à un moment donné, en fonction de critères donnés, pour un profil de navigant donné (Liu, 2017). Nous avons axé nos travaux sur cette seconde clé de succès, dans la mesure où la planification de chemin représente le cœur des systèmes d'aide à la navigation (extérieure ou extérieure). Au-delà de ce qui se fait en navigation extérieure, l'analyse de l'intérieur d'un bâtiment présente des défis originaux à relever. Les points suivants illustrent les aspects qui distinguent les environnements intérieurs des environnements extérieurs et complexifient la problématique de planification de chemin intérieur (Russo, 2013 ; Stoffel, 2009) :

- **Diversités des formes** : les routes ont des propriétés standard comme la largeur, le nombre des voies, le rayon de virage ; la structure d'un réseau routier est clairement définie et régulière : chaque jonction est un point de décision et les segments de routes sont linéaires. En revanche, les architectes ont plus de liberté dans la conception d'un bâtiment ; les espaces peuvent varier en taille et en forme en fonc-

tion de leur nature et de leur fonction. Ceci rend l'analyse d'un environnement intérieur moins déterministe que celle d'un environnement extérieur.

- **Libertés en mouvement** : les véhicules sont parfois contraints d'emprunter des voies spécifiques et les conducteurs doivent respecter des règles, consignées dans un code de la route. En revanche, les piétons à l'intérieur des bâtiments peuvent circuler plus librement, surtout dans les grands bâtiments publics et les espaces ouverts. Cela complique la planification de chemin intérieur.
- **Type de réseau** : le réseau routier peut être modélisé en deux dimensions, à partir d'éléments standards associés à des représentations graphiques ; par exemple, les nœuds représentent les intersections et les arcs représentent les tronçons de route élémentaires entre ces intersections. La planification de chemin intérieur dans un bâtiment, à moins de la limiter à un étage, doit prendre en compte l'existence de plusieurs niveaux et d'une plus grande variété de types d'espaces et de transitions.

Notre contribution de recherche ambitionne de proposer une méthode de planification de chemin à l'intérieur de bâtiments complexes tels que ceux identifiés précédemment. À partir d'un modèle de bâtiment, destiné à fournir les informations sémantiques, géométriques et topologiques des composants du bâtiment et de leur organisation, nous chercherons à proposer une planification automatique de chemin adaptée à un profil de navigant, en prenant aussi en compte l'état d'accessibilité des espaces et des transitions, comme illustré dans la figure ci-dessous.

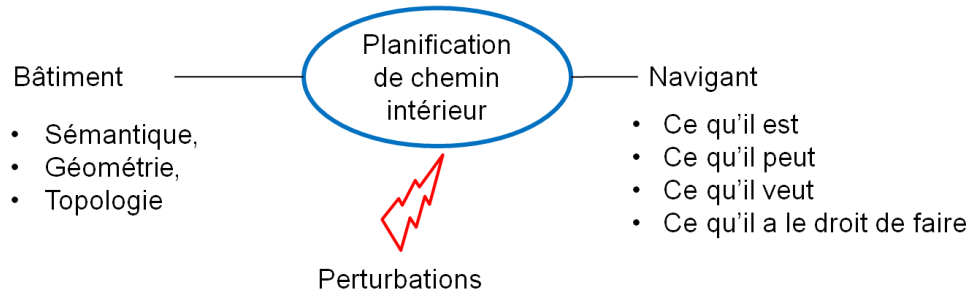


Figure 9 : Objectifs de la thèse

La recherche sur la planification de chemin intérieure est multidisciplinaire et concerne plusieurs domaines comme la **robotique mobile**, pour planifier le chemin d'un robot dans les environnements statiques ou dynamiques (Duchoň et al., 2014 ; Khatib, 1986), l'**analyse spatiale intérieure** (Afyouni et al., 2012; Diakité and Zlatanova, 2018), la **géolocalisation intérieure** d'objets et de personnes, en raison des atténuations des signaux GPS à l'intérieur (Blattner et al., 2015 ; Kul et al., 2014), la navigation et le suivi intérieur en temps réel **LBS (location based service)** (Basiri et al., 2017), l'**automatique** en termes d'analyse automatique des environnements intérieurs (détection des obstacles, des passages…) (Donkers et al., 2016 ; Xiong et al., 2017), l'**intelligence artificielle** (Noreen et al., 2016 ; Soltani et al., 2002) au regard

des besoins en optimisation et développement d'algorithmes de recherche de chemin ou **Wayfinding** (Rodriguez-Sanchez and Martinez-Romo, 2017). Nos travaux de recherche se placent résolument dans la thématique de l'**automatique**, et visent à fournir le plus automatiquement possible une consigne d'itinéraire à un navigant profilé.

1.4 Conclusion

Le chapitre a montré l'intérêt de la planification de chemin à l'intérieur des bâtiments complexes. Elle est utile tout au long du cycle de vie d'un bâtiment. En conception, elle permet de vérifier l'accessibilité de chaque espace et d'évaluer des scénarios d'évacuation d'urgence. En construction, elle permet de guider des ouvriers et des engins pour qu'ils puissent circuler en toute sécurité dans un chantier par nature changeant. En exploitation, elle est utile pour aider des visiteurs à se repérer, pour guider les opérateurs de maintenance et assister les premiers intervenants en cas d'urgence, en milieu inconnu.

La planification de chemin nécessite un modèle de l'environnement intérieur dans lequel est envisagé le déplacement. Ce modèle doit pouvoir fournir les informations nécessaires contraignant la planification de chemin du point de vue sémantique (la nature des espaces et des transitions), géométrique (la position des points d'intérêt, les dimensions des espaces et des transitions) et topologique (l'organisation des espaces et transitions, sur plusieurs niveaux, en 3 dimensions). De plus, plusieurs contraintes intimement liées à la planification de chemin, que l'on ne peut ignorer en étudiant ce problème, devront être prises en compte. D'abord, il faudra considérer le profil du navigant. Ensuite, il faudra prendre en compte l'accessibilité conjoncturelle des espaces et l'aspect dynamique de leurs changements d'état.

Le chapitre suivant étudiera tout d'abord les modèles existants permettant de représenter un bâtiment, tel que les modèles géométriques 2D/3D, le BIM au format IFC, les standards CityGML et IndoorGML. Une deuxième partie détaillera les méthodes identifiées dans la littérature scientifique pour exploiter les modèles de bâtiment à des fins de planification de chemin puis les différentes approches existantes pour représenter un navigant dans un processus de planification de chemin. Une troisième partie se focalisera sur l'analyse des différentes approches de recherche en planification de chemin basée sur un modèle BIM, afin d'en souligner les points intéressants et les insuffisances. Ce deuxième chapitre sera donc destiné à cerner les spécifications de notre contribution.

Chapitre 2 : Etat de l'art

2.1 Introduction
2.2 Modèles de bâtiments
2.2.1 Modèle CAO 2D et 3D
2.2.1 Building Information Modeling (BIM)/IFC
2.2.1.1 Rechercher scientifique autour de BIM
2.2.1.2 Architecture d'IFC
2.2.1.3 Modélisation d'un bâtiment au moyen des IFC
2.2.2 CityGML
2.2.3 IndoorGML
2.2.3 Pertinence des standards pour la planification de chemin
2.3 La planification de chemin intérieur
2.3.1 Représentation de l'environnement intérieur
2.3.1.1 Décomposition en cellule
2.3.1.2 Méthode de graphe ou RoadMap
2.3.2 Algorithmes de recherche du plus court chemin
2.3.2.1 Algorithme de Djikstra
2.3.2.1 Algorithme de A*
2.3.3 Représentation d'un navigant dans la planification de chemin
2.4 Planification de chemin basée sur un BIM
2.4.1 Vérification d'évacuation
2.4.2 Aide aux visiteurs
2.4.3 Aide aux secouristes
2.4.4 Aide aux opérateurs de maintenances
2.4.5 Evaluation des approches
2.5 Conclusion

2.1 Introduction

La planification de chemin intérieur nécessite un modèle de l'environnement intérieur intégrant les caractéristiques sémantiques, géométriques et topologiques déterminantes pour la mobilité. Nous consacrons la première partie de ce chapitre à détailler les modèles susceptibles d'être utilisés à cette fin. Ceux-ci seront décrits et évalués, au regard de leur aptitude à supporter une planification automatique de chemin intérieur. La deuxième partie se focalise sur les méthodes utilisées pour caractériser et préparer les modèles d'environnement intérieur pour la planification de chemin d'une part, sur les modèles permettant de représenter un navigant d'autre part. Une dernière partie se focalise sur les approches développées par les chercheurs qui ont tenté d'aborder la même problématique. Ces approches sont ensuite évaluées pour vérifier la prise en considération des contraintes exprimées dans le premier chapitre.

2.2 Modèles de bâtiments

Pour étudier la planification de chemin, il faut disposer d'un modèle qui représente l'intérieur du bâtiment considéré (espaces, transitions) et intègre suffisamment

d'informations sémantiques, géométriques et topologiques. Plusieurs modèles sont utilisés pour représenter un bâtiment dans l'industrie AEC, tels que les modèles CAO 2D/3D, le BIM en format IFC, les standards CityGML et IndoorGML.

2.2.1 Modèle CAO 2D/3D

Les modèles 2D se présentent sous forme de plans, aux fins de représenter les différents étages d'un bâtiment en vue de dessus. On appelle « plan » une coupe horizontale exécutée à 1 mètre au-dessus du sol fini de l'étage considéré. Les conventions de représentation des coupes s'appliquent :

- Trait renforcé pour le contour des parties appartenant au plan de coupe,
- Trait fort pour les arêtes vues situées en arrière du plan de coupe,
- Hachurage ou pochage des parties coupées.

Un plan 2D standard intègre des symboles permettant d'identifier des murs, des portes, des fenêtres. Il peut être enrichi de côtes précisant la longueur et la largeur des espaces, l'épaisseur des murs, la position relative des ouvertures...

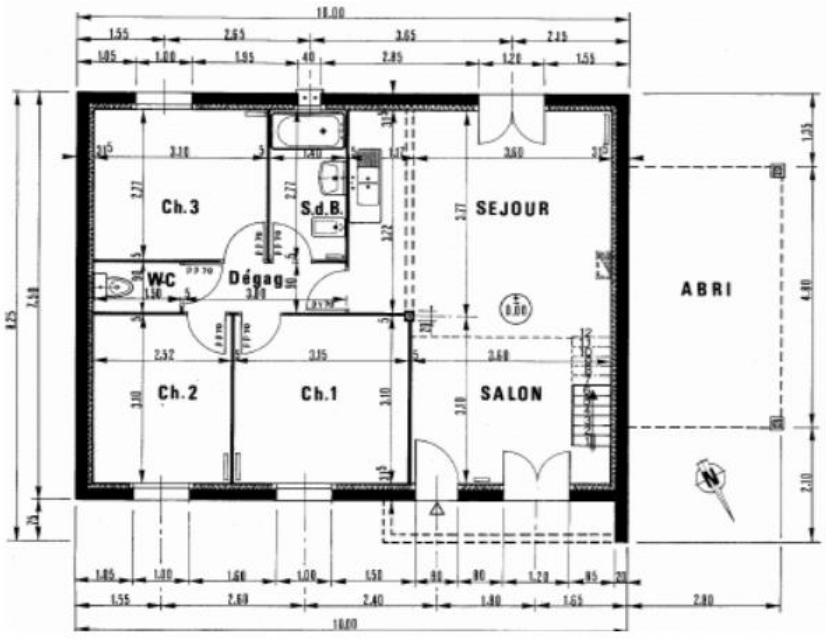


Figure 10 : Plan 2D d'un étage

Un modèle 2D ne résulte pas forcément d'une opération de coupe d'un modèle 3D. Il peut avoir été produit directement en tant que dessin, assisté ou non par ordinateur.

Un modèle 3D est une représentation tridimensionnelle de l'objet « bâtiment ». Cette modélisation permet la représentation, le plus souvent à base de segments de droites et de surfaces planes (mais aussi d'arcs de cercles ou d'ellipses, de cylindres ou d'ellipsoïdes, ou encore de tout modèle géométrique approprié), des frontières géo-

métriques extérieures et intérieures d'un bâtiment dans l'espace. Par rapport au plan 2D, les erreurs d'interprétation sont diminuées du fait des compléments d'information apportés par la troisième dimension (Horna et al., 2009). La 3D permet donc de traiter des géométries plus complexes que la 2D et surtout, de représenter de manière homogène l'ensemble des niveaux d'un bâtiment. Les modèles 3D sont en général édités au moyen de logiciels métiers comme ceux d'Autodesk (AutoCAD, 3D studio MAX, XSI, MAYA), de Dassault Systèmes (SolidsWork, CATIA), ou encore FreeCAD, Tekla Structures, Sketchup, etc.

L'usage de la CAO 3D en AEC étant relativement récent, beaucoup de bâtiments existants ne sont définis que par des plans 2D, sans qu'il existe de maquette 3D disponible. Plusieurs études ont été menées au cours de deux dernières décennies (Lewis and Séquin, 1998) sur la possibilité de reconstruire des modèles 3D à partir d'anciens plans 2D. Les approches reposent essentiellement sur le même principe, à savoir l'interprétation des données présentes dans un premier temps, l'extraction des composants ciblés (murs, ouvertures, etc.) puis l'extrusion des objets 2D pour obtenir les constituants du modèle 3D. La différence se fait ainsi sur le niveau de détail et l'enrichissement en informations sémantiques des composants des bâtiments (Gimenez et al., 2016, 2015).

2.2.3 Building Information Modeling (BIM)/ IFC

Le terme Building Information Modeling (BIM) correspond en français à celui de Maquette Numérique de Projet de construction (MNP). La paternité du concept de BIM est attribuée à Charles M. Eastman (Georgia Tech, USA), qui a utilisé cet acronyme pour la première fois dans les années 1970. Il a commencé à être repris au milieu des années 1980. Ce concept a beaucoup évolué au cours des 30 dernières années. Il n'a vraiment été appliqué largement dans le domaine de l'AEC qu'au cours de la dernière décennie.

Une abondante littérature a été consacrée à l'étude des pratiques des professionnels du bâtiment, entrepreneurs, architectes et ingénieurs de bureaux d'études, et à la caractérisation de leurs perceptions et leurs définitions du BIM. Le rapport intitulé « La valeur ajoutée du BIM pour la construction dans les grands marchés mondiaux » de McGraw Hill (McGraw Hill, 2014), définit le BIM comme « un processus de création et d'utilisation de modèles numériques pour la conception, la construction et/ou l'exploitation de projets ». C'est aussi « un modèle 3D intelligent qui peut être construit numériquement en contenant toutes les informations de construction, dans un format intelligent qui peut être utilisé pour développer des solutions de construction optimisées avec un risque réduit avant de s'engager dans une proposition de design » (J.Woo et al., 2010). (Zuppa et al., 2009) ont constaté, après consultation de 202 professionnels de l'AEC, que « le BIM est perçu comme un outil de visualisa-

tion et de coordination des travaux de AEC, pour éviter les erreurs et améliorer la productivité, le calendrier, la sécurité, le coût et la qualité des projets de construction ». (Eastman et al., 2011) a introduit le caractère dual du BIM « Building Information Modeling, ou Building Information Model (BIM), est une technologie et des processus associés pour produire, communiquer et analyser des modèles de construction ». (Barlish and Sullivan, 2012) suggèrent d'utiliser la définition de référence suivante, issue du comité de projet de l'Alliance buildingSMART : « Le BIM est une représentation des caractéristiques fonctionnelles et géométriques d'un ouvrage. En tant que telle, elle sert de ressource de connaissances partagées pour s'informer sur l'ouvrage et offrir une base fiable de prise de décision concernant tout son cycle de vie ». Le BIM se définit à la fois comme un processus de gestion et de production de données, un modèle unique du bâtiment, un logiciel parce qu'il fonctionne en intégrant une série de logiciels. La variété des définitions du BIM illustre la confusion dans la définition et la quantification de BIM, parce que le BIM est un modèle collaboratif entre les différents intervenants d'un projet de construction et chacun a sa vision sur le BIM(Barlish and Sullivan, 2012). Par exemple, les architectes sont plus susceptibles de voir les avantages du BIM tels que l'amélioration de la coordination, la visualisation et les opérations commerciales, tandis que les entrepreneurs constatent des améliorations dans l'ordonnancement, l'estimation précoce des coûts du projet, etc.

Le BIM est adossé à un ensemble de classes standard représentatives du secteur du bâtiment, appelées IFC (Industry Foundation Classes). Grâce aux IFC, toutes les applications de construction peuvent théoriquement communiquer entre elles en se basent sur une seule et même organisation de données de l'ouvrage, en cours d'étude, en cours de construction, puis en cours d'exploitation. Les IFC sont développées et maintenues par buildingSMART. La dernière version (IFC4) a fait l'objet de la norme ISO 16739 (buildingSMART, 2013), basée sur le langage EXPRESS qui avait été développé pour la CAO mécanique (Chen et al., 2005; Venugopal et al., 2012). IFC définit plusieurs formats de fichiers tels qu'IFC-SPF (IFC-SPF est le format le plus utilisé ; c'est un format texte lisible par l'humain, défini par la norme ISO 10303-21-STEP), IFC-XML (Vanlande et al., 2008) et IFC-ZIP (Sun et al., 2015).

2.2.3.1 Recherche scientifique autour de BIM

Au cours de la dernière décennie, le BIM est devenu un sujet fécond de recherche pour le génie civil et l'automatisation de la construction. Plusieurs applications dans différents domaines ont été développées autour du BIM, comme l'estimation de coût (Cheung et al., 2012; Ma et al., 2013), le calcul de quantités (Choi et al., 2015; Monteiro and Poças Martins, 2013), la vérification automatique des règles de construction (Eastman et al., 2009; Solihin and Eastman, 2015), l'analyse automatique de sûreté

au travail en cours de construction (J. Wang et al., 2015; Zhang et al., 2015, 2013), l'analyse énergétique de bâtiment (Bazjanac, 2009), l'estimation de quantités de déchets (Cheng and Ma, 2013), la modélisation de bâtiment tels que construits (Hong et al., 2015; Tang et al., 2010; C. Wang et al., 2015) ou tels qu'endommagés (Ma et al., 2015; Ma Ling et al., 2016). Certains chercheurs ont aussi tenté d'intégrer le BIM dans un système d'information géographique (SIG) pour répondre aux différentes exigences de l'analyse de la construction (Irizarry et al., 2013), de l'urbanisme (Steve and Benjamin, 2017), de la sécurité intérieure ou encore d'autres applications.

Ces exemples montrent que la recherche scientifique autour de BIM est un sujet d'actualité prolifique, et que la maquette BIM d'un bâtiment représente aujourd'hui un support robuste pour la plupart des projets de recherche liés au domaine de l'automatisation de la construction.

2.2.3.2 Architecture des IFC

L'architecture des IFC est modulaire, comme le montre la Figure 11 suivante :

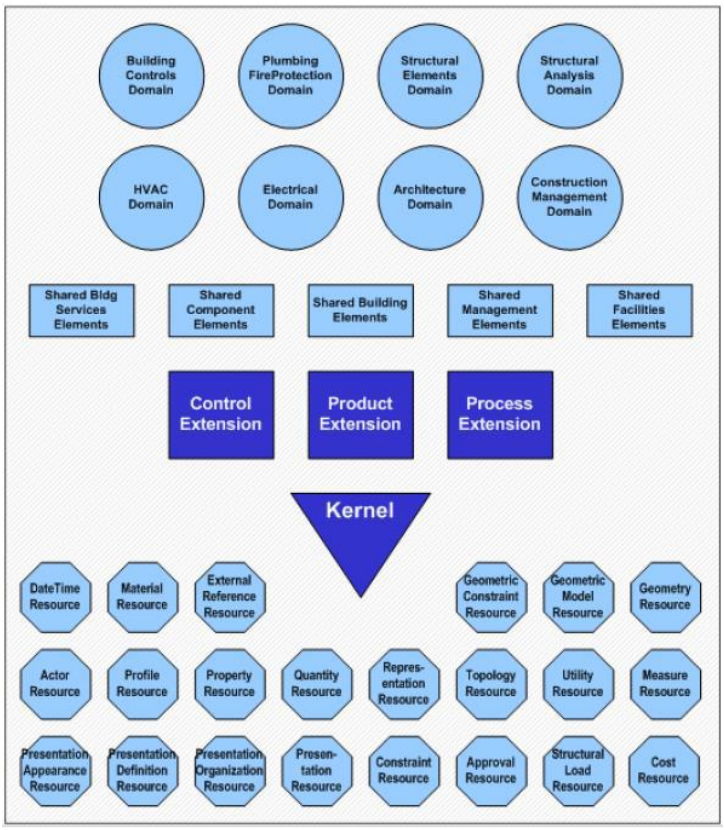


Figure 11 : Architecture IFC4

Cette architecture est signifiante pour les développeurs de logiciels qui veulent travailler avec les IFC, comme les éditeurs d'outils BIM, mais elle est transparente pour un utilisateur final. On y distingue quatre couches (buildingSMART, 2013) :

1. La couche la plus haute organise les entités par domaine d'activité (représentés par des cercles) comme l'architecture, l'électricité, HVAC 67 (Heating Ventilation AirConditioning), la gestion de patrimoine;
2. La couche de l'interopérabilité (représentée par les rectangles) contient les éléments à échanger, tels que les constituants du bâtiment (par exemple : les voiles, les colonnes, les poutres), les services, les éléments qui contribuent à la bonne gestion du projet de construction;
3. La couche du noyau et de ses extensions (représentés respectivement par des carrés et des triangles) rassemble les concepts génériques signifiants pour différents métiers, dans des classes de haut niveau, telles que (**IfcObject**) ou (**IfcActor**);
4. La couche inférieure contient des ressources (représentées par des octogones), entités d'usage général comme celles qui traitent de la géométrie des objets et des relations topologiques.

2.2.3.2 Modélisation d'un bâtiment au moyen des IFC

Avec les IFC, un bâtiment (**IfcBuilding**) s'inscrit dans un site (**IfcSite**) et se décompose en niveaux (**IfcBuildingStorey**), grâce à la relation d'agrégation **IfcRelAggregates**. Un niveau se décompose lui-même en espaces (**IfcSpace**) en utilisant la même relation générique d'agrégation (Laakso and Kiviniemi, 2012; Liebich, 2010) (Figure 12).

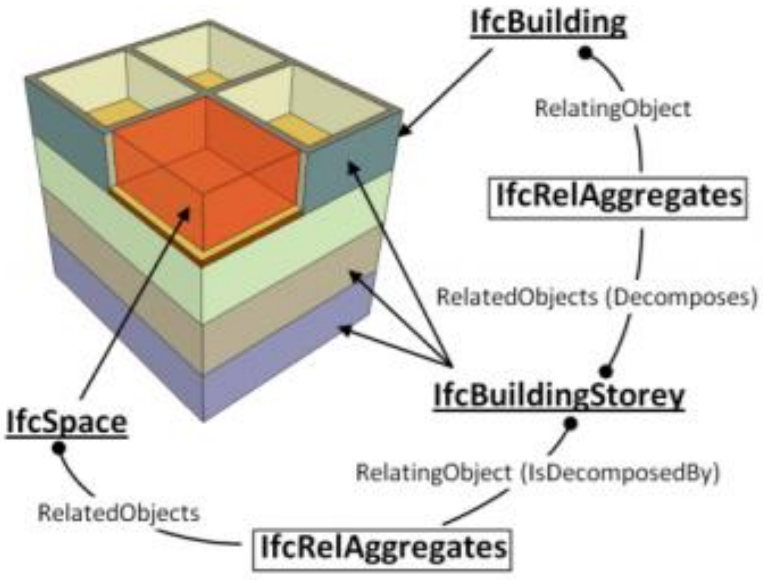


Figure 12 : Structure d'un bâtiment défini en IFC

Les éléments de construction comprennent tous les éléments qui font physiquement partie du bâtiment, c'est-à-dire ses constituants structurels et de séparation des espaces. Ils sont représentés par une entité **IfcBuildingElement**.

Les **IfcBuildingElement** utilisent des mécanismes de référencement mutuel au moyen de classes « relation », ce qui se traduit par des attributs inverse (ils référencent l'objet « relation », qui les référence en retour ainsi que l'objet qui est relié), pour exprimer leur appartenance à un groupe, leur composition, leurs propriétés, etc. Les **IfcBuildingElements** définis dans IFC4 sont listés dans la Figure 13.

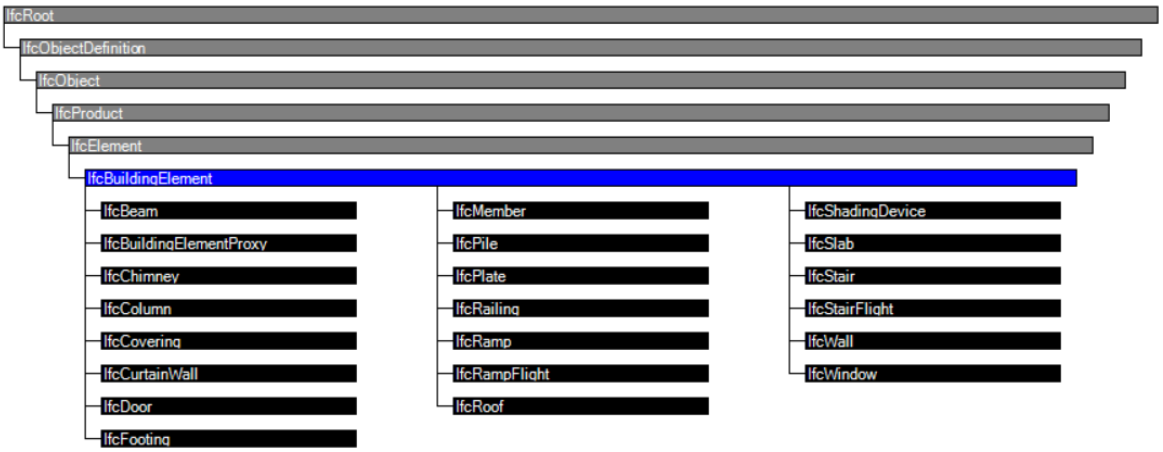


Figure 13 : Liste d'IfcBuildingElement (buildingSMART, 2013)

Les IFC véhiculent une grande richesse sémantique à propos de l'organisation de l'intérieur des bâtiments, qui semble intéressante pour la planification de chemin intérieur. La version 2x3 d'IFC, la plus utilisée actuellement, contient 653 entités et plus de 300 types de données supplémentaires par rapport à la version précédente, ainsi que des ensembles de propriétés (P-Set) extensibles. Mais seulement une petite partie des classes sont directement liées à la planification de chemin intérieur, à savoir les espaces à parcourir (IfcSpace) et les obstacles ou transitions entre ces espaces : IfcWall, IfcWindow, IfcDoor, IfcStair, IfcRamp, IfcTransportElement, ou encore les obstacles internes aux espaces : IfcFurnishingElement. En particulier, l'entité IfcTransportElement couvre les concepts d'ascenseurs, d'escalators et de tapis roulants. De plus, les IFC contiennent des relations utiles pour la planification de chemin comme IfcRelSpaceBoundary et IfcRelContainedInSpatialStructure. L'IfcRelspaceBoundary, est une relation qui renseigne sur la frontière physique ou virtuelle d'un espace. On peut par exemple identifier la relation entre l'espace et les portes associées à cet espace, qui font partie de la frontière physique de l'espace (Figure 14). L'IfcRelContainedInSpatialStructure, représente une relation de contenance d'un objet par rapport à l'espace ou à l'étage. Par exemple, un IfcSpace peut contenir plusieurs IfcFurnishingElement, qui seraient à considérer comme autant d'obstacles pour la planification de chemin interne à cet espace.

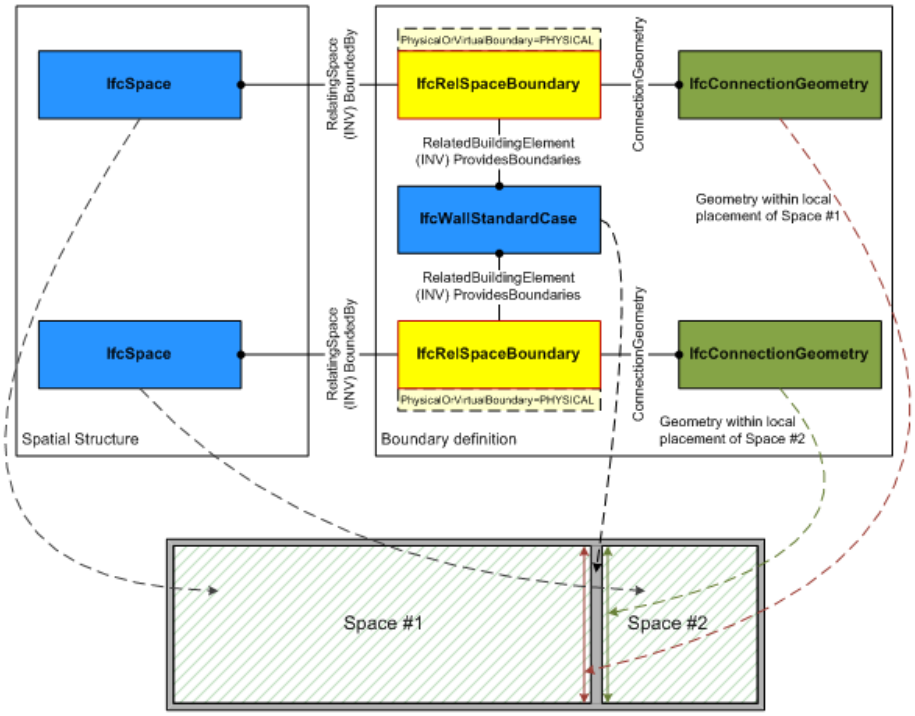


Figure 14 : IfcRelSpaceBoundary(BuildingSmart, 2013)

2.2.4 CityGML

CityGML est un standard produit et maintenu au niveau mondial par l'Open Geospatial Consortium (OGC®) pour la représentation, le stockage et l'échange de modèles virtuels 3D de villes et d'aménagements extérieurs. Ce modèle est structuré sur 5 niveaux de détails (Figure 15), dans lesquels les mêmes éléments peuvent être représentés différemment : LOD0 : environnement/paysage, LOD1 : ville/région, LOD2 : arrondissement de ville/projet, LOD3 : modèle d'architecture d'extérieur/parcelle, LOD4 : modèle d'architecture d'intérieur (Gröger and Plümer, 2012) .

L'objet de notre recherche nous incite à nous intéresser plus particulièrement au niveau 4, qui fournit des informations géométriques et sémantiques de bâtiments, vus de l'extérieur comme de l'intérieur. Contrairement aux IFC, les concepts de niveau ou d'étage ne sont pas définis. Ils peuvent toutefois être explicités en effectuant un traitement géométrique et en agrégeant tous les éléments qui partagent la même élévation (Filippo, 2013).

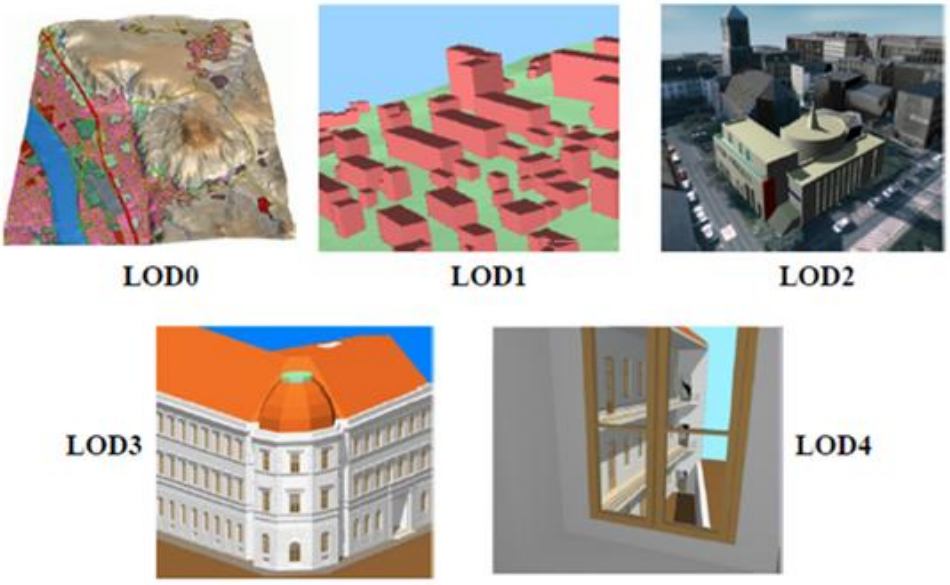


Figure 15 : Les 5 niveaux de détail de CityGML (Gröger and Plümer, 2012)

Dans la dernière (v2.0.0) du CityGML LOD4, les classes en relation avec la planification de chemin intérieur sont : Room, FloorSurface, GroundSurface, Opening (qui généralise Door et Window), BuildingFurniture, IntBuildingInstallation et InteriorWallSurface (Figure 16). Les classes Room, FloorSurface, GroundSurface se réfèrent aux espaces/surfaces navigables dans un bâtiment. Concernant les transitions verticales (escaliers, ascenseurs et escalator), ils font de partie de IntBuildingInstallation dans CityGML (Gröger and Plümer, 2012). Les classes Room, InteriorWallSurface et Door peuvent être utilisées pour déduire les connexions entre les espaces. Par exemple, une instance InteriorWallSurface peut contenir une occurrence Door, et l'instance Room délimitée par cette InteriorWallSurface est liée à l'instance Door. De cette manière, toutes les instances Room connectées via cette porte sont connectées (Liu and Zlatanova, 2013).

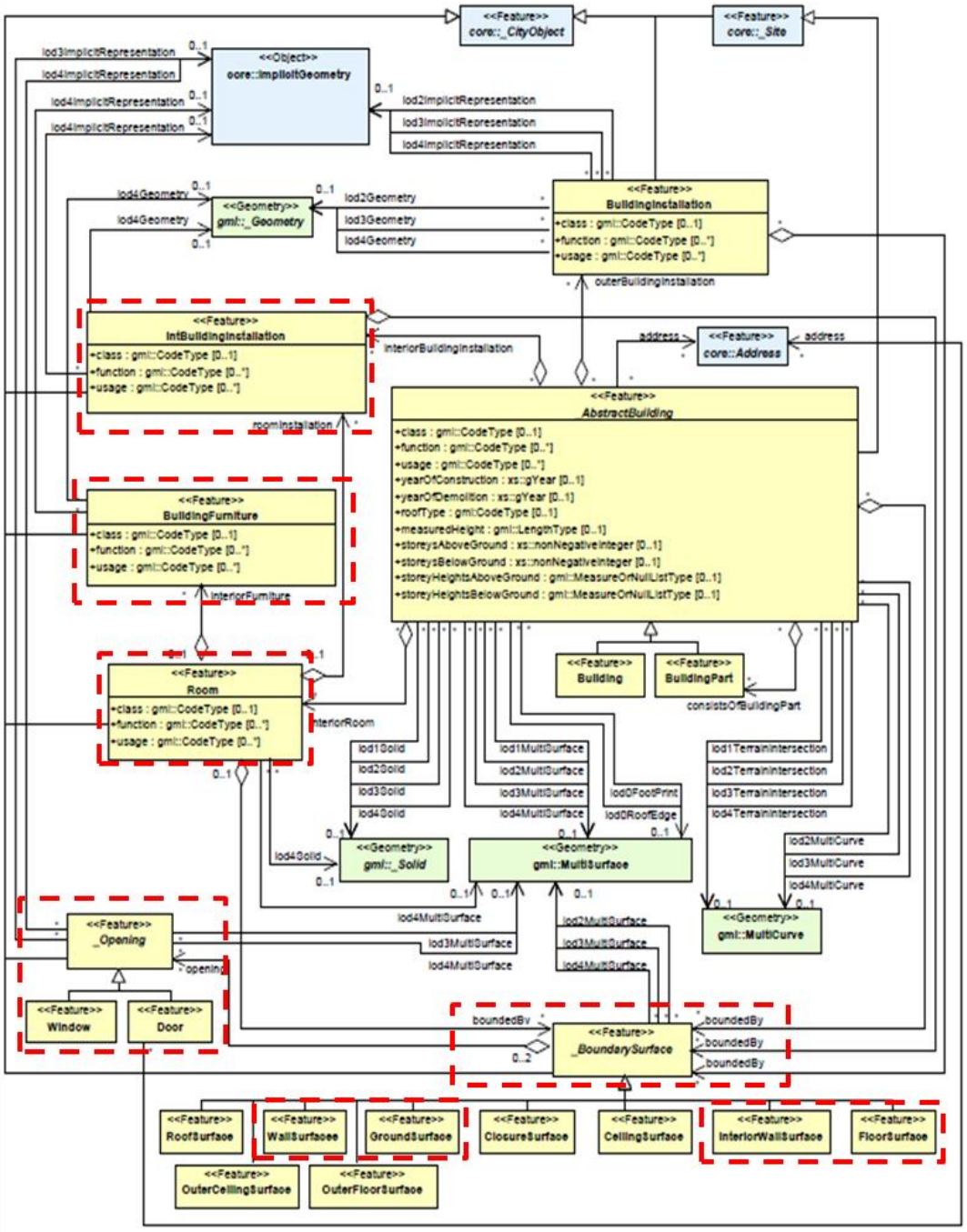


Figure 16 : Diagramme UML d'un modèle de bâtiment en CityGML. Le rectangle rouge fait référence aux classes en relation avec la planification de chemin (Gröger and Plümer, 2012)

2.2.5 IndoorGML

Ce standard émergent (la version 1.0 est sortie en décembre 2014) spécifie un modèle ouvert basé sur XML pour représenter les informations spatiales à l'intérieur d'un bâtiment. IndoorGML est un schéma d'application d'OGC® GML 3.2.1 ("IndoorGML OGC," n.d.).

Les concepts importants d'IndoorGML sont les cellules, identifiées et localisées, la sémantique des connectivités entre cellules (notamment la navigabilité : passage ou obstacle), la géométrie 2D ou 3D (qui peut être éludée, définie extérieurement en référence à un modèle CityGML par exemple, ou encore définie dans IndoorGML selon les préconisations de l'ISO 19107), la topologie des espaces (par une représentation duale au modèle géométrique, sous forme de graphes) et enfin une représentation multiple (espaces physiques, zones de couverture wifi, Bluetooth ou Rfid) et enfin multi-niveaux (bâtiment, étage, aile, pièce, partition...). La Figure 17 illustre, dans sa partie gauche, la manière dont une certaine organisation d'espaces, d'obstacles et de passages physiques (dans l'espace euclidien), peut être interprétée en termes de graphes de navigation (dans l'espace dual). Le graphe explicite le fait que l'espace 3 est un nœud de passage "de" et "vers" les espaces 1, 2 et 4. On peut en outre naviguer directement entre 1 et 2 (Kang and Li, 2017; Ryoo et al., 2015).

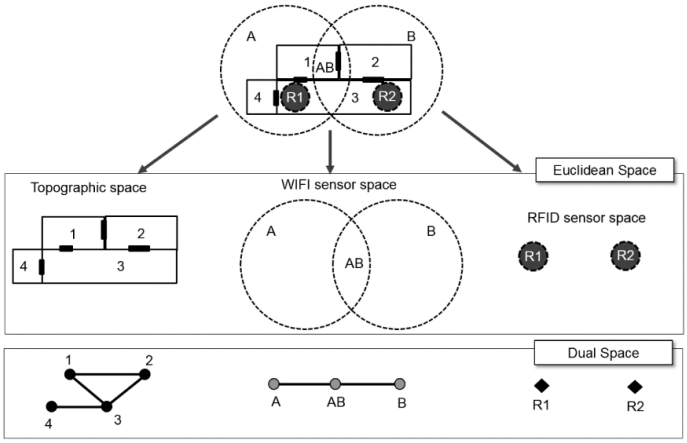


Figure 17 : Multi-représentation d'espaces dans IndoorGML ("IndoorGML OGC," n.d.)

2.2.6 Pertinence des standards pour la planification automatique de chemin

La planification automatique de chemin repose sur la qualité de la représentation de l'environnement intérieur. Si l'on dispose d'un modèle de l'environnement intérieur suffisamment riche du point de vue géométrique (la localisation, les dimensions des constituants), sémantique (permettant par exemple d'interpréter une porte comme un point de passage horizontal entre deux espaces voisins) et topologique (permettant par exemple de savoir qu'un espace est muni de portes, ou que deux espaces sont voisins), l'étude de planification de chemin sera facilitée. Dans la section ci-dessous, nous comparons les différents modèles standards de représentation de bâtiments par rapport aux besoins de la planification automatique de chemin.

Les modèles 2D ou 3D susceptibles d'être produits par les modeleurs géométriques génériques intègrent des informations géométriques précises sur les dimensions des constituants physiques du bâtiment, mais se révèlent trop pauvres en informations sémantiques (la nature des espaces) et topologiques (le concept de voisinage ne se perçoit que visuellement) absolument nécessaires à la planification de chemin. Les espaces y sont implicites, identifiables par les bornes visuelles que représentent les murs, dalles et plafonds.

Concernant les deux standards IndoorGML et CityGML, (Ryoo et al., 2015) y ont consacré une étude comparative. Les auteurs ont notamment comparé les différents points de vue offerts par ces représentations ainsi que les applications proposées par ces deux standards, comme la fermeture de l'espace, l'espace mural, la décomposition cellulaire, l'analyse de visibilité, l'analyse de chemin, etc… Du point de vue géométrique et sémantique, l'étude a montré que CityGML est plus riche qu'IndoorGML grâce à la représentation géométrique GM-Solide des espaces et GM_MultiSurface des composants des bâtiments tels que les murs, les portes et les installations intérieures, ainsi que les caractéristiques attribuées aux surfaces des composants. Du point de vue topologique, IndoorGML, dans la mesure où il est dédié aux applications de navigation intérieure, s'avère plus riche que le CityGML (Filippo, 2013). Avec le CityGML, les pièces (Room) sont topologiquement reliées par les surfaces représentant les murs, les ouvertures, les surfaces des fermetures. Donc les pièces sont définies comme étant adjacentes si elles ont des surfaces et des ouvertures communes (Figure 18).

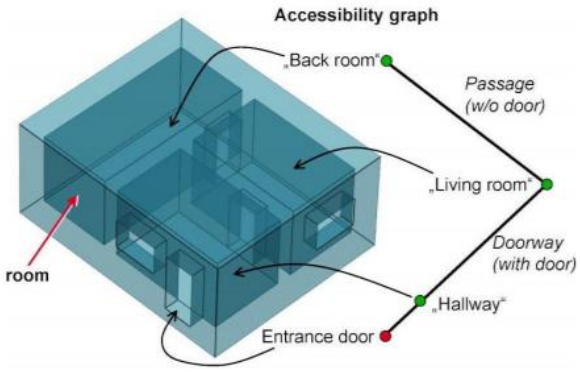


Figure 18 : Graphe d'accessibilité dérivé des pièces adjacentes

Les résultats de l'étude comparative entre les deux standards sont résumés dans le Tableau 1 (Ryoo et al., 2015).

Tableau 1 : Comparaison entre CityGML et InddorGML (Ryoo et al., 2015)

Viewpoint	CityGML	IndoorGML
Model	Feature model	Cellular space model
Visualization	Supported	Not supported
Geometric analysis	Excellent	Poor
Route analysis	Poor	Excellent

Concernant le modèle IFC, il est caractérisé par une géométrie riche qui intègre les concepts de processus de modélisation solide (CSG), de représentation des frontières de l'objet (Brep), d'objets prismés (SweptSolid), de restriction dans une fenêtre ou une boîte (clipping), d'encombrement (BoundingBox), etc. Chacun de ces modèles est adapté à un grand nombre d'applications et de simulations (mécanique, thermique, sismique…). Les logiciels d'architecture utilisent souvent le CSG et le Brep, tandis que les logiciels de structure nécessitent très souvent le SweptSolid. De plus, son format géométrique riche le rend apte à être converti dans d'autres formats, tels que le CityGML LOD4 ; mais il est pour cela nécessaire d'utiliser le modèle de surface (El-Mekawy et al., 2012). Du point de vue sémantique, l'IFC est très riche grâce aux ensembles entités typées et porteuses de propriétés (**P-Set**) et aux réseaux de relations attribuées aux composants du bâtiment. Topologiquement parlant, et contrairement au CityGML, les espaces sont reliés par des éléments de bâtiments comme les murs, les portes, les fenêtres… avec la relation **IfcRelSpaceBoudary**, qui renseigne sur la frontière physique et virtuelle de l'espace. Le schéma IFC normalisé à ce jour (IFC4), s'il définit bien l'architecture du bâtiment, n'est en revanche pas de tout significatif pour la navigation intérieure, car la topologie entre les espaces n'est pas explicitée. Concrètement, le modèle ne donne aucune information explicite sur le concept de passage possible d'un espace à un autre. Ce concept peut toutefois être explicité (révélé) au moyen d'un raisonnement algorithmique, en se basent sur les informations géométriques et sémantiques du modèle IFC.

Le Tableau 2 ci-dessous résume les points forts et faibles de ces trois standards.

Tableau 2 : Points forts et faibles des modèles géométriques 2D/3D, IFC, CityGML et IndoorGML

Standard / Information	Modèle 2D, 3D	IFC	CityGML	IndoorGML
Géométrique	++	+++	++	+
Sémantique	+	++++	++	+
Topologique	+++	+	+	+++
Degré d'utilisation	++++	+++	++	+

Le tableau ci-dessus montre que le modèle IFC est le plus riche suivant tous les critères utiles à la planification automatique de chemin, sauf sur le plan de la topologie. L'utilisation du modèle IFC semble donc devoir être privilégiée. De plus, il est le plus développé et le plus mature en tant que standard répandu dans l'industrie AEC. La section suivante détaillera les méthodes utilisées pour caractériser les environnements intérieurs pour la planification de chemin ainsi que les méthodes utilisées pour représenter un navigant à des fins de planification de chemin.

2.3 La planification de chemin intérieur

2.3.1 Représentation de l'environnement intérieur

La planification automatique de chemin a été abondamment abordée dans le domaine de la robotique mobile, ou de la simulation de déplacements d'agents dans des environnements virtuels (pour des applications de jeux vidéo, par exemple). Dans les deux cas, le robot ou l'agent ont besoin de construire ou de posséder une représentation de l'environnement afin de pouvoir élaborer une tactique d'évolution autonome dans ces environnements (Lopez, 2012). La formalisation de la planification de chemin va donc s'appuyer sur la représentation de cet environnement. Comme introduit dans le chapitre 1, il existe deux grandes familles de techniques pour représenter l'environnement intérieur pour planifier un chemin : la décomposition en cellules et la méthode de graphe (on l'appelle aussi carte de cheminement ou Roadmap on anglais).

2.3.1.1 Décomposition cellulaire

Cette approche consiste à discrétiser l'espace en cellules de formes prédéfinies pour caractériser les environnements intérieurs. Ces cellules représentent des ensembles des configurations libres et sont interconnectées afin de capturer la connectivité de l'environnement. Cette approche a été adoptée dans plusieurs travaux et a conduit à la mise en œuvre de nombreuses méthodes. Celles-ci sont généralement classées en deux catégories : décomposition approchée en cellules et décomposition exactes en cellules.

Pour un déplacement au sol, donc dans un espace assimilable à un plan, la décomposition approchée consiste à discrétiser l'espace en cellules uniformes, le plus souvent des carrés ou des rectangles (Chestnutt et al., 2003). Les obstacles de l'environnement sont projetés sur la grille permettant de marquer les cellules encombrées (Figure 19).

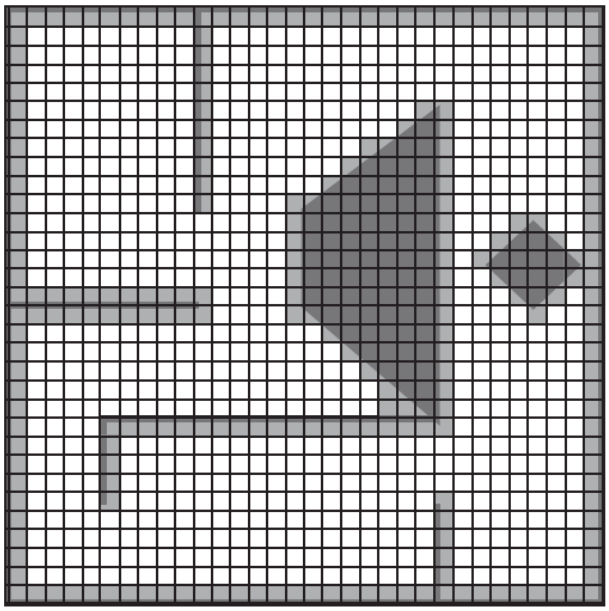


Figure 19 : Décomposition cellulaire approchée

Une décomposition exacte est obtenue en faisant coïncider les limites de l'espace navigable avec le bord des cellules. Parmi les techniques utilisées, on trouve la décomposition verticale et les triangulations de Delaunay (Kallmann et al., 2003).

Les méthodes de décomposition en cellules, qu'elles soient approchées ou exactes, s'adressent à des problèmes de planification de chemins de faibles dimensions. En effet, lorsque les dimensions de l'espace de recherche augmentent, la planification de chemin devient plus difficile et plus coûteuse en ressources de calcul.

Il existe aussi la méthode décompositions en cellule 3D (Voxels). Cette méthode permet de représenter la structure 3D de l'espace intérieur. Des niveaux intermé-

diaires présents dans un étage ou dans un espace, comme des rampes ou des mezzanines, peuvent y être représentés. (Yuan and Schneider, 2011) proposent un modèle appelé graphe LEGO basé sur la 3D Voxels. Cette méthode calcule les parties accessibles des environnements intérieurs, tout en tenant compte des contraintes de l'encombrement physique du navigant.

(Bandi and Thalmann, 1998) proposent de discrétiser les espaces intérieurs en 3D voxels, pour calculer un chemin praticable sans collision pour une personne, en considérant les obstacles surmontables et insurmontables dans les bâtiments (Figure 20).

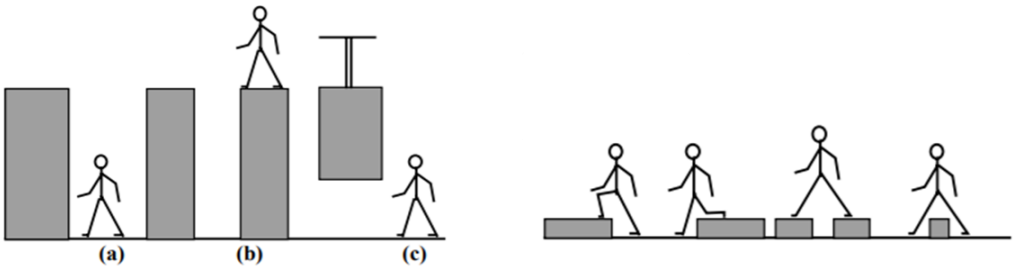


Figure 20 : A gauche les obstacles insurmontables (un personne ne peut pas : (a)grimper, (b) traverser et (c) passer à travers); à droite les obstacles surmontables (Bandi and Thalmann, 1998)

2.3.1.2 Méthode de graphe ou RoadMap

Un graphe, ou carte de cheminement est une représentation implicite de l'environnement intérieur, particulièrement bien adaptée pour la recherche de chemin de grande dimension, contrairement aux méthodes de décomposition cellulaire (Afyouni, 2013). Deux méthodes standardisées peuvent être distinguées pour les cartes de cheminement : les graphes de visibilité et les diagrammes de Voronoï généralisés (Russo, 2013; Stoffel, 2009).

- **Graphe de visibilité** : ils ont été proposés initialement par Nilsson en 1969 (Nilsson, 1969), avant de s'imposer comme une méthode standard pour la planification de chemin d'un robot mobile. Il s'agit de représenter les angles de l'espace, les sommets des obstacles et les portes par des nœuds ; deux nœuds sont considérés comme mutuellement visibles si la liaison entre les deux nœuds ne passe pas à travers des frontières de l'espace ou des obstacles (Figure 21).

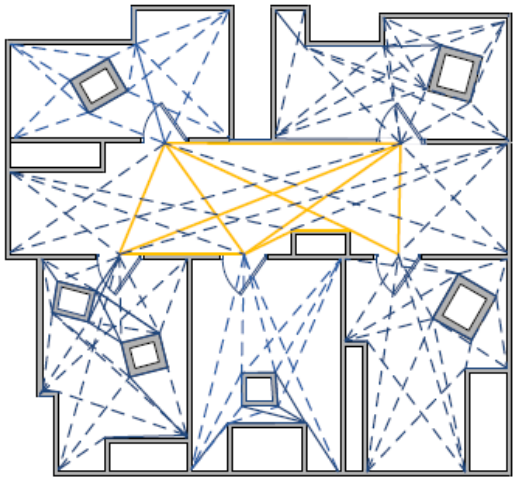


Figure 21 : Exemple de graphe de visibilité

- **Les diagrammes de Voronoï généralisés** : ils ont été conçus pour guider les robots et leur permettre de se déplacer sans collision. Le principe est de créer un ensemble des points localement les plus éloignés de tout obstacle. L'utilisation de ces points pour la création d'une carte de cheminement permet donc de générer des chemins présentant une marge de sécurité maximale vis-à-vis des obstacles et de supprimer les chemins trop proches des bordures d'espaces (Lopez, 2012) (Figure 22).

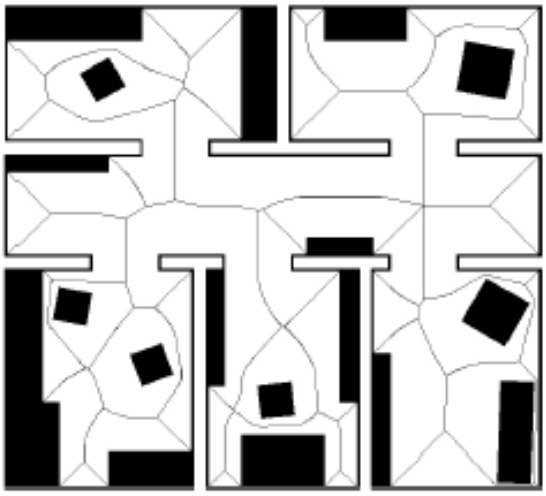


Figure 22 : Exemple de diagramme de Voronoi généralisé

Les deux méthodes présentées ci-dessus simplifient le problème de la planification, en transformant les environnements intérieurs en graphes faciles à exploiter. De base, elles étaient conçues pour la planification de chemin des robots dans des environnements statiques, mais peuvent être adaptées pour la navigation de tout type de navigant, y compris la navigation humaine (Stoffel, 2009). Plusieurs modèles de graphes

ont été proposés et adaptés pour la navigation humaine, tel que le dual graphe, Media Axis Transformation (MAT), Centerline Graph, ou des combinaisons de ceux-ci (Afyouni et al., 2012). Certains ont aussi appliqué le graphe hiérarchique (Figure 23) pour modéliser les environnements intérieurs complexes à des fins de navigation intérieure pour les piétons (Stoffel, 2009).

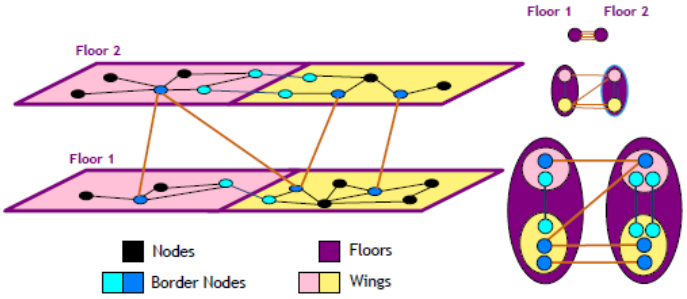


Figure 23 : Graphe hiérarchique d'un bâtiment (Stoffel, 2009)

2.3.2 Algorithmes de recherche du plus court chemin

La représentation de l'environnement en graphe ramène le problème de recherche de chemin à un problème de parcours de graphe en vue de trouver, parmi tous les chemins possibles, un chemin optimal. La recherche de chemin dans un graphe est un problème classique d'intelligence artificielle. Elle est, dans le cas le plus simple, effectuée sur un graphe G = {N ; A} avec une seule fonction de coût total c : A→ℝ à optimiser. La fonction de coût c est attribuée à chaque arête a ∈ A sous forme d'une valeur numérique v ∈ ℝ indiquant le poids ou le coût respectif de chaque arête. Plusieurs algorithmes ont été développés pour répondre à ce problème, les plus connus étant l'algorithme de Dijkstra, l'algorithme A*. L'algorithme D* (un A* dynamique) a également été développé pour la navigation robotique dans les environnements changeants (Krause, 1995).

2.3.2.1 Algorithme de Dijkstra

L'algorithme porte le nom de son inventeur, l'informaticien néerlandais Edsger Dijkstra. Il a vu le jour en 1959. Le principe de cet algorithme est de considérer un point (nœud) de départ et d'affecter à chaque autre nœud sa distance minimale au nœud de départ. Pour cela, on prend le nœud N de distance minimale (la première fois, c'est le nœud de départ lui-même), et on affecte à ses voisins Vi la distance de N plus la valeur attribuée à l'arc entre N et Vi. Si un nœud est revisité, alors on met éventuellement à jour sa valeur, si la nouvelle distance trouvée s'avère inférieure à la distance précédemment connue. À la fin de ce processus, on connaît le plus court chemin, depuis le nœud de départ vers n'importe quel nœud du graphe. D'une manière générale,

Dijkstra part dans toutes les directions et ne prend pas en compte le nœud d'arrivée a priori (Harika Reddy, 2013).

*2.3.2.2 Algorithme de A **

L'algorithme A* (A-étoile ou A-star) est généralement utilisé dans les jeux vidéo et constitue une extension de l'algorithme Dijkstra. Contrairement à Djikstra, A* cherche a priori à se diriger vers le nœud d'arrivée, à l'aide d'une heuristique. A chaque itération, il va tenter de se rapprocher de la destination et va donc privilégier les possibilités directement plus proches de la destination, en mettant de côté toutes les autres (Duchoň et al., 2014; Kumar Guruji et al., 2016).

Toutes les possibilités ne permettant pas de se rapprocher de la destination sont mises de côté dans une liste de possibilités secondaires, si jamais la solution actuellement recherchée s'avérait infructueuse, parce qu'on ne peut pas prédire si un chemin va aboutir ou s'il sera finalement le plus court. L'algorithme va se diriger directement vers les chemins les plus directs. Si ces chemins n'aboutissent pas ou s'avèrent peu performants par la suite, on examinera la liste de possibilités secondaires.

La recherche de chemin dans les environnements intérieurs exige plusieurs indications de trajet, en comparaison du même problème dans un environnement extérieur. Les critères pour chercher un chemin dans les environnements extérieurs sont principalement la distance, le temps du trajet, le nombre de tours, qui sont tous basés sur des informations métriques (Dudas et al., 2009). En revanche, il existe plusieurs facteurs non géométriques influençant la recherche de chemin intérieur, tels que les critères sociaux. Il s'agit de règles imposées par la vie sociale, par exemple de ne pas choisir un chemin qui traverse un bureau, une salle de réunion ou un laboratoire (Stoffel, 2009). (Dudas et al., 2009) ont défini 2 types de chemins: les chemins possibles et les chemins confortables. Le terme possible fait référence à des chemins à envisager pour un navigant qui a des besoins spéciaux (par exemple, une personne à mobilité réduite), tandis que le terme confortable indique le sous-ensemble de chemins réalisables qui est supposé préférable pour le navigant. Chaque arc dans un graphe est affecté d'un poids qui représente le degré de confort du navigant. Dans les environnements intérieurs, le temps et la sécurité sont des facteurs essentiels dans les situations d'urgence. Dans cette perceptive, un autre critère non géométrique est le moindre effort, qui minimise le temps de trajet total requis pour atteindre une destination (Chen et al., 2014). (Fang et al., 2011) proposent une approche d'optimisation multicritères pour résoudre le problème d'évacuation. Trois critères sont considérés dans cette approche : le temps d'évacuation minimal, la distance minimale d'évacuation et les degrés d'encombrement cumulés minimaux.

2.3.3 Représentation d'un navigant dans la planification de chemin

La planification de chemin doit prendre en compte le profil du navigant, car elle l'amènera à se déplacer en mobilisant ses différentes capacités de mouvement (Lopez, 2012). La circulation à l'intérieur des bâtiments n'est pas limitée aux personnes; on peut rencontrer plusieurs profils de navigants, par exemple les personnes à mobilité réduite, des chariots, des personnes habilitées ou non, des robots, des transpalettes, des engins en général, des objets volumineux à transporter (Liu and Zlatanova, 2015), voire des drones qui évoluent en 3 dimensions. Ces différents types de navigants n'ont pas les mêmes caractéristiques, les mêmes degrés de liberté, la même capacité de mouvement et le même niveau d'habilitation ; le meilleur chemin ne sera donc pas le même pour tous.

Afin de représenter le concept de navigant dans un processus de planification de chemin, la plupart des chercheurs utilisent le volume englobant du navigant (Figure 24), ce qui permet de réduire les degrés de liberté du navigant (Kuffner, 1998; Li and Huang, 2004; Shiller et al., 2001). Avec cette méthode, il suffit que le volume englobant ne soit pas en collision avec les obstacles pour valider une position sans collision du navigant.

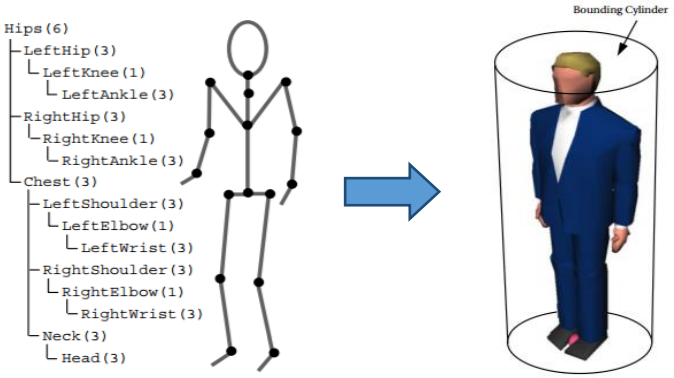


Figure 24 : Navigant représenté par son cylindre englobant (Kuffner, 1998)

Une autre méthode a été utilisée pour découpler l'animation du navigant et la planification de chemin ; il s'agit de restreindre les volumes intérieurs de l'espace et des transitions en décalant leurs frontières vers l'intérieur. Le but est de créer des zones réputées navigables par tout point du navigant à l'intérieur de l'espace (Figure 25). Le module de navigation dans Unity (logiciel pour développer des jeux vidéo) utilise ce principe pour définir une contrainte de navigation dans les environnements virtuels ("Unity - Manual : Navigation System in Unity," n.d.).

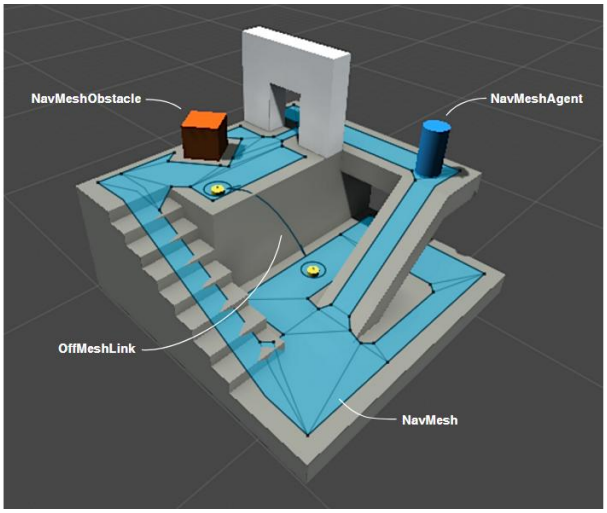


Figure 25 : Module de navigation dans le logiciel Unity (les zones en bleu sont navigables)

La planification de chemin d'un robot mobile nécessite aussi de prendre en compte les dimensions du robot. La méthode de MinKowski sum (De Berg and Cheong, 2008; Liu, 2017) a été largement appliquée pour identifier les zones inaccessibles pour un robot. La Figure 26 ci-dessous présente un exemple où un robot se dirige vers un obstacle. Le robot est représenté en 2D par un cercle qui englobe l'encombrement du robot. Le principe de la méthode est d'étendre l'obstacle en fonction de la taille du robot (le rayon du cercle), tandis que l'encombrement du robot est ramené à un point de référence. Si les zones inaccessibles se croisent, elles seront fusionnées en une zone inaccessible interdite au robot. Le reste de l'espace (hors zones inaccessibles) sera considéré comme un espace libre pour le robot.

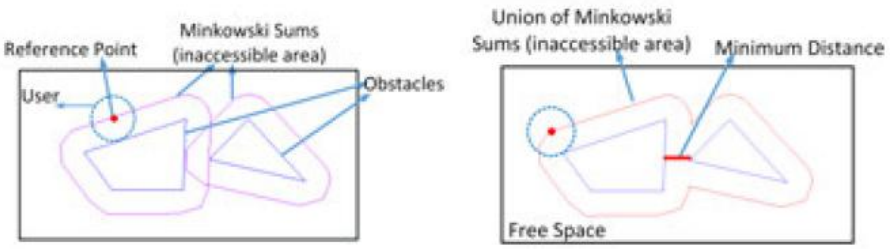


Figure 26 : Principe de la Méthode MinKowski sums

Pour planifier le chemin d'un navigant donné, il ne s'agit pas seulement de prendre en compte son encombrement physique, mais aussi son aptitude au déplacement. (Han et al., 2002; Pruski, 2010) ont appliqué la méthode de MinKowski sum pour définir les zones accessibles d'une personne qui utilise un fauteuil roulant.

Après avoir détaillé les modèles qui représentent l'environnement intérieur ainsi que les méthodes utilisées pour caractériser et préparer ces environnements pour étudier

la planification de chemin, la suite de ce chapitre se focalise sur les travaux de recherche précisément consacrés à la planification de chemin basée sur un BIM.

2.4 Planification du chemin basée sur un BIM

Depuis l'essor du BIM, plusieurs travaux de recherche récents ont tenté d'exploiter automatiquement les modèles 3D de bâtiments basés sur un BIM en IFC, dans une perspective de planification de chemin, en interprétant les informations essentiellement géométriques et sémantiques présentes dans ces modèles. Les approches rencontrées visaient souvent une application spécifique, comme la vérification automatique des règles d'évacuation en phase de conception de l'ouvrage, un support pour aider des visiteurs, des secouristes ou des opérateurs de maintenance en phase d'exploitation. Nous avons gardé cette logique de structuration « par application » pour synthétiser l'état de l'art.

Aucune approche récente basée sur un modèle BIM n'a été identifiée, qui aborde la question de planification de chemin en phase de construction. Seules deux approches ont été trouvées, un peu anciennes, basées sur des plans 2D. (Kang and Miranda, 2006) ont développé 3 algorithmes (QuickLink, QuickGuess, RandomGuess) pour planifier le levage de la grue dans un chantier de construction, un problème fondamental de planification de chantier, puisque chaque pièce déplacée devient un obstacle pour les pièces suivantes. QuickLink sert à construire un réseau de points entre un point de départ et un point d'arrivée, en ajoutant des points aléatoires et en vérifiant leur pertinence. Si la connexion entre deux points se fait sans collision avec la structure du bâtiment, un trajet possible est créé. RandomGuess réalise l'échantillonnage de points aléatoires. QuickGuess crée un nouveau point entre deux réseaux quand le point peut atteindre à la fois le réseau origine et le réseau destination sans collision. (Soltani et al., 2002) proposent une application de planification de circulation dans les chantiers de construction basée sur l'algorithme Dijkstra, en prenant en compte 3 critères: la date de livraison, la sécurité et la visibilité (soumise à une interprétation humaine). L'application a pour but d'aider les responsables de chantiers à trouver un chemin sans danger pour les ouvriers et les véhicules. La planification de chemin se fait à partir de plans 2D, en négligeant certaines informations géométriques (ex : dimensions des passages) et la sémantique associée aux espaces (accessibles ou non) et aux passages (franchissables ou non). Le manque de recherche dans cette phase est peut-être lié à la complexité du problème, dans la mesure où un chantier de construction n'a pas un état stable, à cause de l'avancement continu des travaux. Pourtant, les logiciels de BIM récents permettent de disposer d'un modèle 4D, qui intègre la notion du temps ou le planning de construction, et permet aux différents acteurs de visualiser et partager la progression des travaux d'une phase de construction.

2.4.1 Vérification d'évacuation

Une approche récente a été trouvée dans ce domaine. (Choi et al. 2014) ont développé un système automatique appelé InSightBIM-Evacuation permettant de vérifier automatiquement, sur la base d'un modèle IFC, la conformité d'un bâtiment à la réglementation sur l'évacuation d'urgence dans les gratte-ciel et les bâtiments complexes. Le processus de vérification est le suivant : le concepteur prépare les règles d'évacuation et les scénarios d'exigence, puis exporte le modèle BIM du bâtiment en format IFC. Ensuite il applique les règles d'évacuation pour chaque élément en utilisant leurs propriétés (P-set) ; les résultats sont résumés dans un rapport à la fin de ce processus (Figure 27).

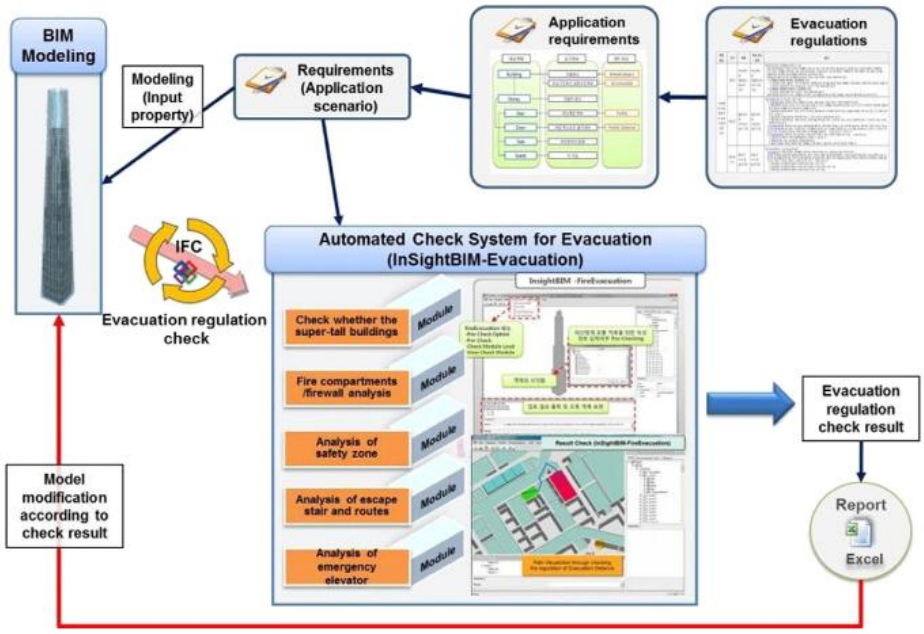


Figure 27 : Processus InSightBIM-Regulation (Choi et al., 2014)

Comme le système se base sur les propriétés existantes de l'IFC, il reste limité aux propriétés existant en relation avec les règles d'évacuations comme les types des portes, des escaliers, le type des matériaux (combustible ou pas)… qui ne couvrent pas tous les scénarios ou les cas qu'on peut rencontrer dans une situation d'urgence.

2.4.2 Aide aux visiteurs

En phase d'exploitation (Lin et al., 2013) ont développé une méthode de planification de chemin basée sur des données IFC. Cette méthode comporte 3 étapes principales (Figure 28). La première étape consiste à extraire les informations géométriques et sémantiques des éléments du bâtiment comme les espaces, les murs, les portes, les meubles, etc. La deuxième étape consiste à discrétiser l'espace et les

composants à l'intérieur et à les transcrire dans une grille plane qui contient des informations géométriques et sémantiques des éléments de construction (pour gérer une circulation dans le même étage; les cages d'escalier et les ascenseurs n'ont pas été pris on compte). Chaque nœud dans la grille comporte une valeur comprise dans l'intervalle [0,1] : 1 si le nœud est navigable, 0 s'il est non navigable et intermédiaire pour représenter un certain niveau de risque. Dans le cas de circulation entre étages, les nœuds dans la cage d'escalier et l'ascenseur sont considérés comme nœuds de transit. La troisième étape consiste à générer le chemin le plus court en appliquant une méthode originale appelée FMM (Fast Marching Method). La méthode s'appuie sur des données IFC enrichies de nouveaux ensembles de propriétés (P-Sets) afin d'augmenter le niveau sémantique des éléments. Par exemple, IfcDoor a une propriété supplémentaire nommée « isLocked » dont la valeur est définie comme IfcBoolean (« ouvert » ou « fermée »).

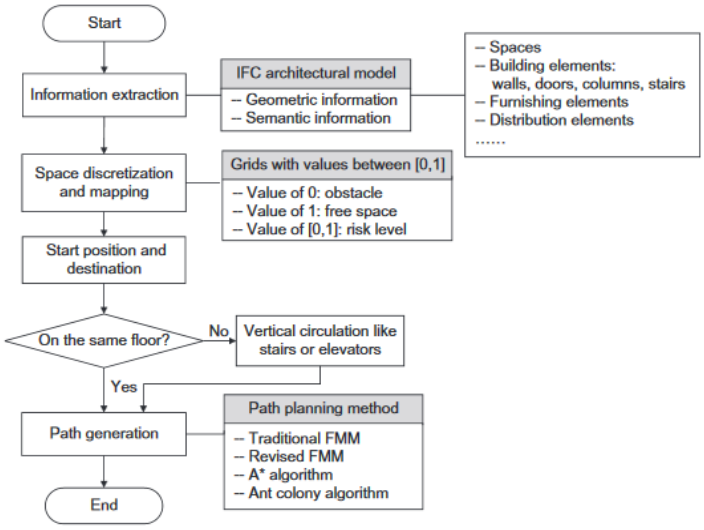


Figure 28 : Algorithme de planification de circulation basé sur un modèle IFC (Lin et al., 2013)

Les auteurs ont utilisé 2 algorithmes pour calculer le chemin le plus court. Dans le premier, appelé FFM (Fast Marching Method) traditionnel, un navigant est représenté par un point immatériel. Dans le second algorithme, appelé FFM amélioré, les auteurs ont pris en considération l'encombrement du navigant en associant au point qui représente le centre de gravité du navigant, un rayon R qui dépend de la taille du cylindre englobant du navigant. Les auteurs ont développé un scénario comparatif entre les deux méthodes, dans le cas d'un chemin étroit à trouver dans un espace en évitant des obstacles connus : une table et un canapé (Figure 29).

Cette méthode est intéressante pour étudier automatiquement les plans de circulation, mais elle souffre de limitations. La précision est liée à la discrétisation d'espace et dépend de la taille de grille. En présence d'une géométrie de grande taille, il faut augmenter la taille de grille. Dans ce cas on peut perdre la trace de petits obstacles.

En présence de géométrie de forme complexe, il faut densifier la discrétisation. Mais lorsque le nombre de nœuds de la grille augmente, le coût de calcul et de stockage augmente significativement. De plus, les auteurs ont eu besoin d'étendre le schéma IFC standard afin d'améliorer la sémantique des composants de bâtiments. Pour certains fichiers IFC, lorsque ces propriétés ne sont pas définies ou sont définies par l'architecte avec des noms différents, l'algorithme est mis en échec.

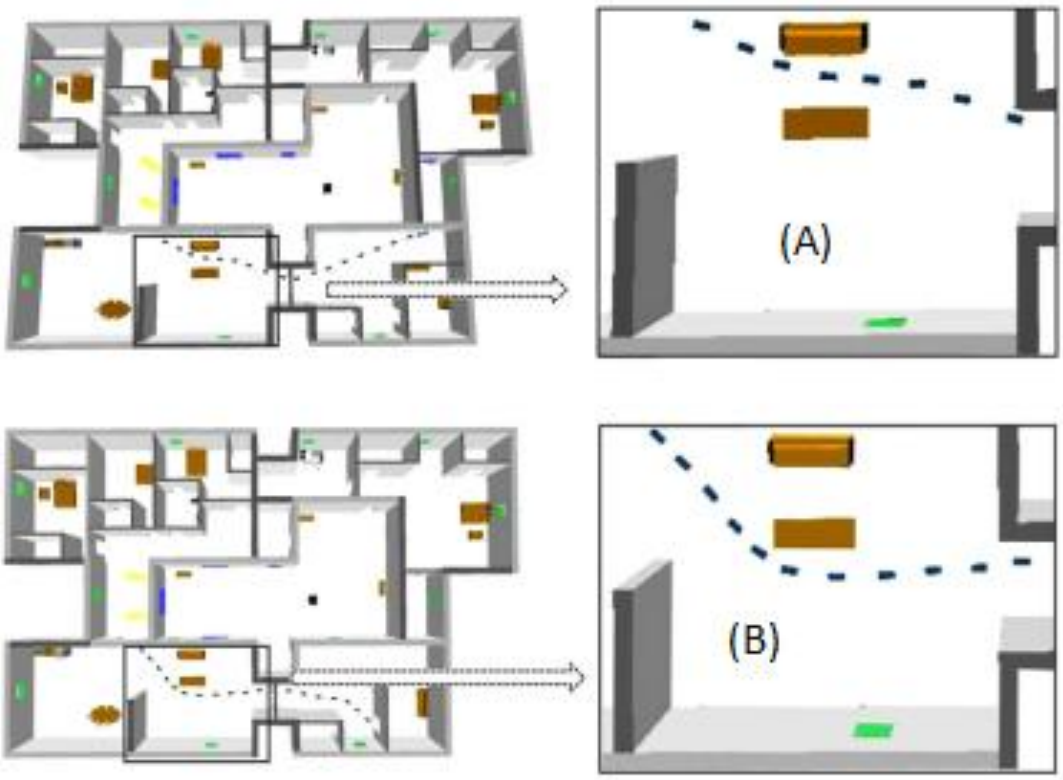


Figure 29 : (A) Chemin le plus court avec FMM traditionnel;
(B) Chemin le plus court avec FMM amélioré (Lin et al., 2013)

(Taneja et al., 2016) ont développé des algorithmes permettant de générer automatiquement des graphes de navigation à partir de données IFC. Les auteurs ont identifié 3 types de graphes de navigation : un réseau basé sur la médiane de chaque espace (centerline network) (Figure 30), un réseau basé sur les dimensions des composants de bâtiments (metric network) et un réseau basé sur une grille 2D de chaque étage. La méthode consiste à utiliser les relations, implicitement présentes dans le modèle IFC, qui lient les différents composants et les différentes pièces du bâtiment. Elle permet d'extraire le plan topologique 2D de chaque étage et analyse la géométrie des éléments pour générer les 3 réseaux de navigation. Seules les informations géométriques sont extraites du modèle IFC, sans prendre en compte les informations sémantiques des composants du bâtiment, qui jouent pourtant un rôle essentiel dans la navigation intérieure.

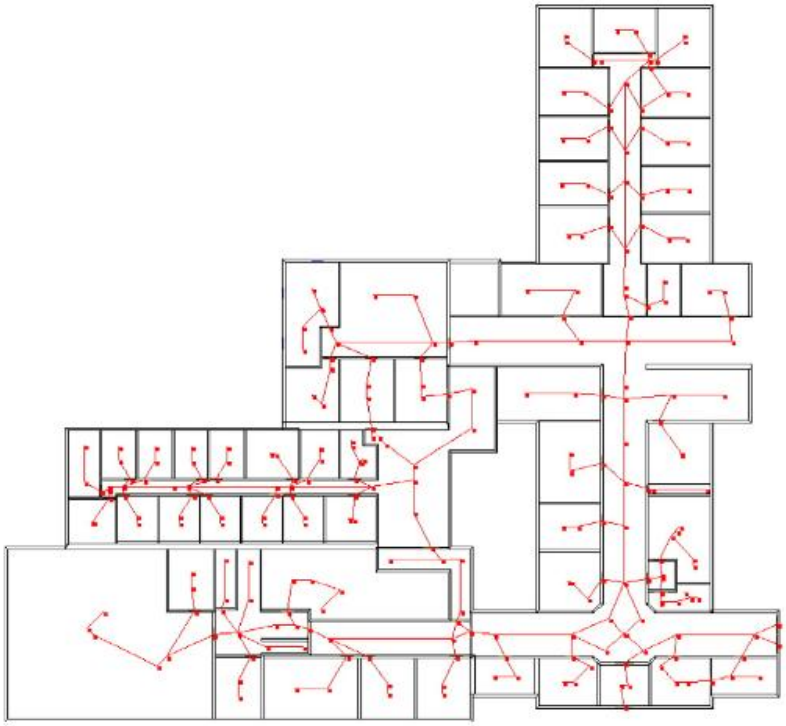


Figure 30 : Centerline network généré à partir d'un BIM

(Lee et al., 2010) ont développé un système permettant de calculer les distances de marche à l'intérieur des bâtiments à partir des données IFC. Le principe consiste à créer des couples de cibles, comme "Door-to-Door"," Door-to-Stair", "Stair-to-Stair", sans souci de l'occupation des espaces à emprunter (Figure 31). Les portes (IfcDoor) et les escaliers (IfcStair) impliqués dans les frontières physiques des espaces (IfcRelSpaceBoundary) sont d'abord extraits du fichier IFC. Ils matérialisent des cibles pour le navigant, qui se rendra de l'une à l'autre en traversant les espaces dans des plans bornés par autant de polygones. Pour prendre en compte l'encombrement du navigant (une personne qui marche), les auteurs ont décalé les frontières des polygones limites d'une distance tampon vers l'intérieur, afin de rétrécir l'espace navigable. Par défaut, cette distance vaut la moitié de la largeur entre épaules d'une personne (1' 0" soit 30,48 cm). Elle est ajustable pour considérer des situations non standard, comme la circulation d'une mère portant un enfant, d'une foule ou encore d'un fauteuil roulant. Cela représente un point fort de cette approche. En revanche, elle reste toujours limitée à l'encombrement physique du navigant, sans considérer ses aptitudes propres ou ses limites d'habilitation. Dans ces travaux, le navigant est matérialisé par un point qui représente le centre de sa tête. De plus, l'approche est basée sur les informations géométriques extraites du modèle IFC, en négligeant la sémantique des composants de bâtiment qui peuvent influencer la planification de chemin intérieur.

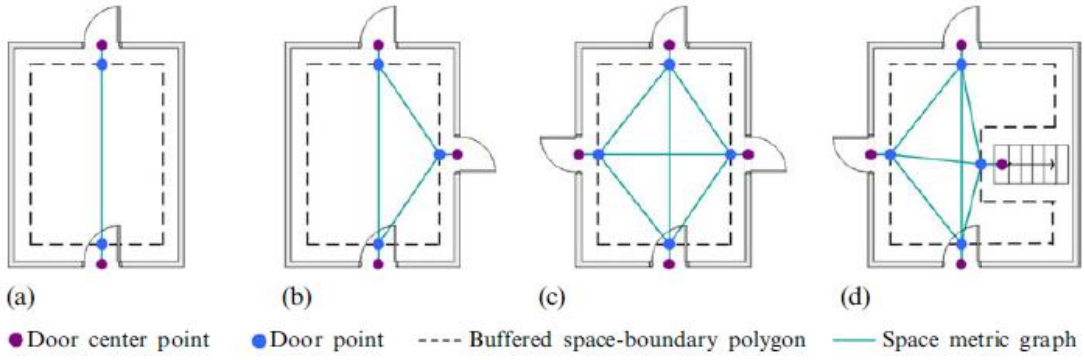


Figure 31 : Graphe de circulation à l'intérieur d'un espace selon le nombre de portes et d'accès verticaux (Lee et al., 2010)

2.4.3 Aide aux secouristes

Concernant les aides aux secouristes, il peut être nécessaire de prendre en compte l'extérieur du bâtiment avant l'intervention. Pour cela, certains travaux de recherche se sont attachés à combiner et étendre les modèles BIM et CityGML pour gérer la planification de chemin intérieur et extérieur. (Isikdag et al., 2013) ont par exemple développé un BIM Oriented Indoor Data Model (BO-IDM). Pour cela, ils ont transféré un BIM dans un environnement géo spatial (ArcGis), en gardant toutes les informations géométriques et sémantiques nécessaires pour étudier la navigation intérieure. Le modèle enrichi a un schéma similaire à IFC. Il conserve les éléments de bâtiments intéressants pour la navigation intérieure (dalle, poutre, poteau, mur, porte,...) et se conforme à l'ISO 19107 en ce qui concerne la représentation géométrique de ces éléments. Le BO-IDM est basé sur 18 classes d'entités (Figure 32) (étage, escalier, ascenseur, espace, dalle, mur, poteau...). Les espaces dans BO-IDM diffèrent des espaces au sens d'IFC. Un espace ne peut pas contenir d'autres espaces, mais constitue un volume fermé qui est délimité par d'autres éléments de construction. La géométrie de l'espace peut être déduite à partir de ses éléments de délimitation. Ce paradigme est similaire à la notion de Room Class dans CityGML. A noter que ce modèle présente l'originalité de contenir des informations concernant le type et l'existence de matières dangereuses dans le bâtiment, ainsi que des informations sémantiques liées aux matériaux (résistance au feu, matière inflammable). Le modèle présente plusieurs limites : les contenus des espaces (meubles, outils, machines) ne sont pas pris en compte. La navigation est en outre étudiée de manière statique, sans prendre en compte l'état d'accessibilité potentiellement changeant des espaces.

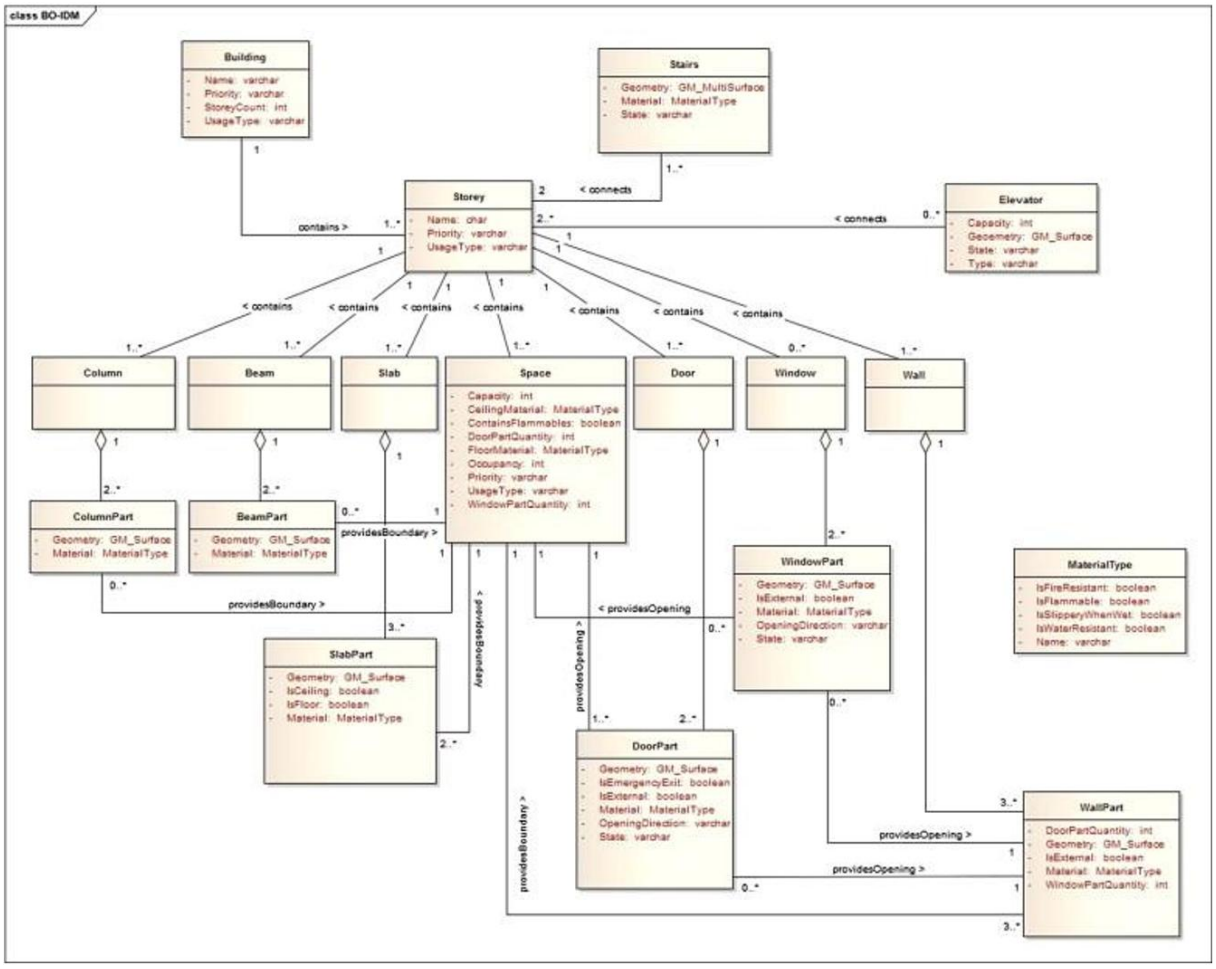


Figure 32 : Schéma de classes de BO-IDM (Isikdag et al., 2013)

(Tashakkori et al., 2015) ont développé le système Indoor Emergency Spatial Model (IESM) basé sur IFC et dédié à la navigation intérieure et extérieure en cas d'incendie. Le système s'appuie sur des données sémantiques et dynamiques (issues de détecteurs de présence), sur des informations caractérisant l'environnement extérieur (réseau routier, aménagements...) et sur une caractérisation des matériaux. IESM procède en 4 étapes (Figure 33) : (1) Les données d'entrée sont un modèle intérieur 2D d'étage, converti en format 3D en utilisant le logiciel Revit. (2) Les informations concernant les services d'urgence et les données IESM (bâtiments, étage, espaces, utilitaires d'incendie, utilitaire d'urgence, détecteurs de l'environnement, informations sur les matériaux, réseau routier) sont ajoutées au modèle 3D BIM pour l'enrichir. (3) Le modèle IFC résultant est exporté dans une base de données géographique (ESRI), pour que les données intérieures et extérieures soient mises en cohérence, en utilisant l'extension d'interopérabilité des données d'ArcGIS. (4) Le modèle 3D de navigation intérieure et extérieure est alors construit. Les pièces et les espaces sont reliés aux couloirs, les escaliers et les ascenseurs sont connectés aux dalles. L'ensemble des données du réseau intérieur est ensuite intégré au réseau rou-

tier pour former un réseau complet (Figure 34). La notion d'espace dans IESM est plus riche que celle de la dernière version d'IFC (IFC4). Elle intègre par exemple le nombre d'occupants, l'existence de risque associé à une présence dans cet espace... Le modèle proposé est focalisé sur la gestion d'une situation d'incendie et a pour but d'aider les secours à appréhender les zones à atteindre en priorité pour secourir les occupants piégés dans le bâtiment. Il se limite à la navigation humaine, avec des vitesses moyennes de circulation horizontale et verticale d'un être humain, qui sont respectivement de 75 pieds/minute et 40 pieds/minutes, pour déterminer le temps d'évacuation en cas d'urgence. L'encombrement des navigants n'est pas pris en compte.

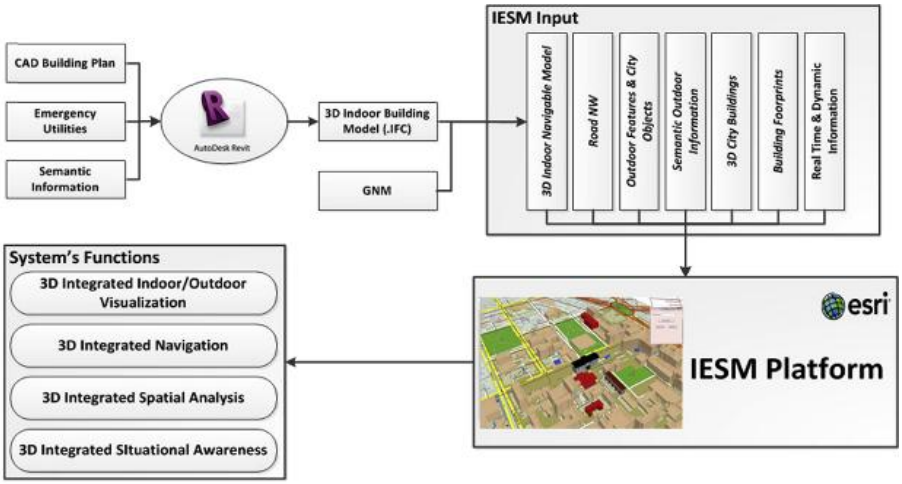


Figure 33 : Planification d'intervention d'urgence avec IESM (Tashakkori et al., 2015)

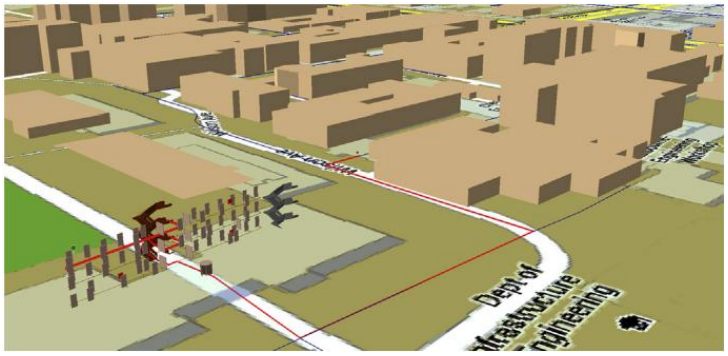


Figure 34 : Réseau de navigation intérieure connecté au réseau routier dans IESM

(Boguslawski et al., 2016) ont développé une nouvelle méthode pour déterminer les chemins d'évacuation dans un bâtiment. Les auteurs se sont focalisés sur les zones dangereuses comme les couloirs et les grands halls, caractérisés par plusieurs entrées et sorties, dans lesquels les personnes éprouvent des difficultés pour trouver la sortie la plus proche. Leur méthode consiste à identifier les espaces offrant plus d'une porte, puis à discrétiser ces espaces en utilisant un algorithme de tessellation. Les

points de nucléation des cellules voisines sont ensuite reliés par des arcs pour construire le graphe de navigation au sein de l'espace (Figure 35). Pour trouver le chemin le plus court, les auteurs ont appliqué l'algorithme de Dijkstra.

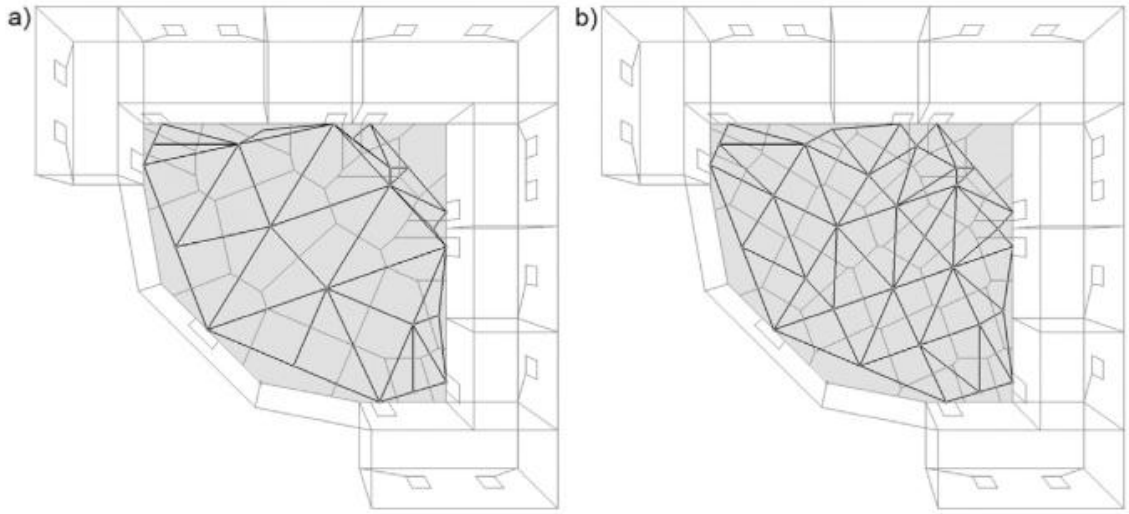


Figure 35 : Tessellation d'un grand espace ouvert (a) Tessellation sans seuil de longueur maximale de liaison entre les cellules ; (b) Tessellation avec seuil de longueur maximale de liaison de 6 m (Boguslawski et al., 2016)

(Teo and Cho, 2016) ont aussi développé un système pour transformer automatiquement les données IFC en format de graphe appelé MGNM (Multi-purpose Geometric Network Model) afin de maîtriser une situation d'urgence. Il s'agit de transformer les objets du bâtiment extraits du modèle IFC en nœuds puis d'associer des caractéristiques sémantiques à ces nœuds. Les liaisons entre les paires de nœuds sont insérées lorsqu'une relation spatiale existe. Ensuite, le MGNM est exporté dans un environnement GIS, pour réaliser la connexion avec le réseau extérieur. Les portes d'entrée de MGNM sont considérées comme des nœuds de transition de l'intérieur vers l'extérieur ou inversement. Le modèle de graphe de MGNM est illustré dans la Figure 36. Les nœuds représentent les centres de gravité des espaces et des transitions. Les arcs représentent les liaisons entre nœuds. Seuls les escaliers sont considérés comme des transitions verticales, sans prendre en considération les ascenseurs ou les rampes. Pendant l'opération d'extraction du modèle IFC, les auteurs exploitent des attributs sémantiques comme le nom de l'entité, par exemple : « Name is Corridor ». Mais si l'architecte n'a pas identifié le nom de l'espace ou bien s'il l'a identifié de manière non standard, le système ne peut pas distinguer un couloir d'un bureau.

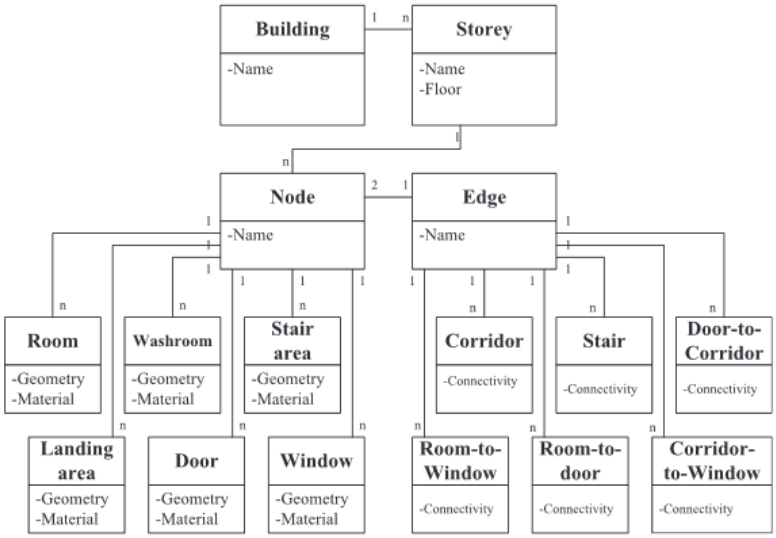


Figure 36 : Modèle de graphe de MGNM

2.4.4 Aide aux opérateurs de maintenance

Pour faciliter la planification de travaux de maintenance et de réparation dans les bâtiments (Koch et al., 2014) ont développé une application de réalité augmentée pour Smartphones. L'application s'appuie sur un modèle BIM et sur des marqueurs naturels dans les bâtiments, comme les signaux de sortie, les extincteurs... Les calendriers d'opérations de maintenance identifient les zones à atteindre. Le modèle BIM fournit les informations concernant la géométrie, les types et la localisation des éléments ; les marqueurs sont utilisés pour la localisation et l'orientation du personnel de maintenance (Figure 37).

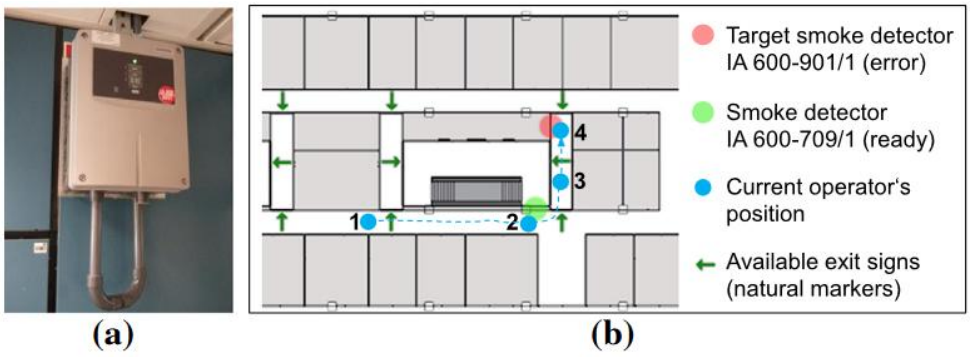


Figure 37 : Configuration expérimentale pour les tests de navigation et de maintenance
(a) détecteur de fumée ; (b) carte de navigation de l'étage

2.4.5 Évaluation des approches

Chaque approche a été évaluée en fonction de plusieurs critères en relation avec les exigences de la planification de chemin, tels que la prise en compte des caractéristiques du navigant (notamment, si le navigant est matérialisé dans l'approche), la prise en compte de l'encombrement des espaces (meubles, équipements), la prise en compte de l'état d'accessibilité des espaces. L'importance de ces critères par rapport à la planification de chemin intérieur a été soulignée dans le chapitre 1. L'évaluation fait ressortir les points suivants :

- **Prise en compte des caractéristiques du navigant :** (Lin et al., 2013) ont amélioré l'algorithme de recherche de chemin FFM traditionnel, qui représente le navigant par un point immatériel, en associant à ce point un rayon R qui dépend de la taille de cylindre englobant du navigant. Dans cette approche, les auteurs ont donné plus de poids à la navigation horizontale, et limité la navigation verticale à un nœud de transition traduisant la présence d'escaliers ou d'ascenseurs. (Lee et al., 2010) ont proposés de réduire l'espace de circulation en décalant les frontières de l'espace avec un distance D qui dépend de la taille de navigant. Les auteurs ont précisé que D peut-être ajustable pour représenter une situation autre que celle d'un bipède classique. Les auteurs n'ont pas pris en compte les dimensions des transitions afin de vérifier que le navigant pouvait les franchir. Dans les deux approches, les auteurs ont limité la prise en compte du navigant à ses caractéristiques d'encombrement physique, mais négligé les restrictions de circulation liées aux aptitudes et limites de mobilité du navigant.
- **Prise en compte de l'encombrement intérieur des espaces :** il n'y a que l'approche de (Lin et al., 2013) qui considère cet aspect, en se basant sur la méthode de la décomposition cellulaire de l'espace, étage par étage. L'inconvenant de cet approche est lié à la précision. Pour des résultats précis, il faut densifier la grille, ce qui impacte le coût et le temps de calcul.
- **Prise en compte de la disponibilité des espaces** : seule l'approche de (Tashakkori et al., 2015) exploite des informations dynamiques en vue de déployer des capteurs de fumée, pour localiser en temps réel les zones de feu et permettre aux secouristes d'adapter la recherche de chemin à la situation temps réel en fonction de la propagation de l'incendie. L'approche est limitée à la gestion d'une situation d'urgence, mais inadaptée pour d'autres scénarios, comme l'évitement de zones de travaux de maintenance.

Des critères supplémentaires ont été considérés, comme le respect du standard IFC « non enrichi », dans la mesure où certains chercheurs ont proposé d'étendre le schéma IFC standard et proposé des entités et propriétés originales pour améliorer la valeur sémantique du modèle, au prix d'un éloignement du standard. Dans ce cas, leur méthode ne peut pas être considérée comme générique. Le cri-

tère de prise en compte du réseau extérieur a été aussi pris en compte dans cette évaluation. Le Tableau 3 ci-dessous résume l'évaluation de l'ensemble des approches.

Tableau 3 : Évaluation des approches récentes trouvées dans la littérature

Application	Critères / Approches	Navigation verticale	Contenu de l'espace	Géométriquement riche	Respect du standard IFC	Dynamique de l'état de l'espace	Type de navigant	L'extérieur du bâtiment
Vérification d'évacuation	(Choi et al., 2014)	✓	×	×	✓	×	×	×
Aide aux visiteurs	(Lin et al., 2013)	×	✓	✓	×	×	✓	×
	(Taneja et al., 2016)	×	×	✓	✓	×	×	×
	(Lee et al., 2010)	✓	×	✓	✓	×	×	×
Aide aux secouristes	(Boguslawski et al., 2016)	✓	×	×	✓	×	×	×
	(Tashakkori et al., 2015)	✓	×	✓	×	✓	×	✓
	(Isikdag et al., 2013)	✓	×	✓	×	×	×	✓
	(Teo and Cho, 2016)	✓	×	×	✓	×	×	✓
Aide aux opérateurs de maintenance	(Koch et al., 2014)	✓	×	×	×	✓	×	×

Les travaux identifiés ont abordé cette question pour une variété d'applications. Les points suivants listent les limitations qui ont été relevées :

- La planification de chemin est presque toujours abordée de manière statique, sans prendre en compte les changements conjoncturels qui peuvent survenir pendant la vie d'un ouvrage

- La navigation est presque toujours limitée à la navigation humaine, sans prendre en compte d'autres types de navigants qui ne présentent pas les mêmes aptitudes de déplacement, les mêmes degrés de liberté de mouvement. Le concept d'autorisation ou d'habilitation à la circulation n'a pas été rencontré,
- Le contenu encombrant des espaces est presque toujours ignoré. Cet aspect représente pourtant un intérêt majeur pour la planification automatique de chemin intérieur, surtout quand il s'agit de bâtiment industriel encombré de machines et présentant des zones dangereuses.

3.5 Conclusion

Cet état de l'art montre que l'aide à la navigation dans des bâtiments, déterminée de manière automatique à partir d'un modèle d'architecture de type BIM, suscite actuellement un vif intérêt en recherche. Les approches identifiées ont abordé cette question pour une variété d'applications (vérifier la conformité de la conception, analyser l'évacuation d'urgence, planifier le chemin pendant l'exploitation, gérer en temps réel une situation d'incendie). Mais elles souffrent des plusieurs limitations telles que la non prise en compte de caractéristiques variables selon les profils de navigants (bipède, objet roulant ou volant) qui peuvent circuler à l'intérieur du bâtiment, négligent le plus souvent le contenu encombrant ou dangereux des espaces à parcourir, mais aussi le caractère changeant dans le temps de l'état d'accessibilité des espaces.

Pour la première partie, le choix d'un BIM en format IFC est justifié par la richesse accordée par ce standard à la représentation des éléments constitutifs des bâtiments du point de vue géométrique et sémantique. Concernant la topologie des espaces pour la navigation interespaces, elle n'est malheureusement pas explicite dans un schéma IFC. Mais ce modèle intègre en revanche des relations entre les éléments du bâtiment qui peuvent être exploitées pour révéler la notion de voisinage. Sans oublier que le BIM en format IFC représente aujourd'hui une base pour la plupart du projet de recherche dans le domaine de l'automatisation de la construction et que son usage est de plus en plus généralisé au sein de la communauté des acteurs de l'industrie AEC, à commencer par les architectes.

Le chapitre suivant détaillera notre proposition de recherche (dénommée BiMov) en ce qui concerne la planification automatique de chemin intérieur à partir d'une maquette numérique du bâtiment (BIM). BiMov exploite le schéma standardisé du modèle IFC et vise à générer un graphe de navigation adapté au profil des différents navigants, en prenant en compte le contenu encombrant ou dangereux des espaces et l'état d'accessibilité conjoncturel de chaque espace ou transition.

Chapitre 3 : Proposition de recherche BiMov

3.1 Introduction
3.2 Architecture du système BiMov
3.3 Analyse d'exigence du système BiMov:
3.3.1 Les cas d'utilisation du système BiMov
3.3.2 Diagramme de classe de BiMov
3.4 Modèles de données de BiMOV
3.4.1 Modèle de bâtiment
3.4.2 Modèle de navigant **Erreur ! Signet non défini.**
3.4.3 Modèle de calendrier **Erreur ! Signet non défini.**
3.4.4 Modèles de graphe
3.5 Construction de graphe
3.5.1 Explicitation des relations de voisinage entre espaces
3.5.2 Construction de graphe Macro et Externe
3.5.3 Construction de graphe Interne
3.6 Restriction de la navigation selon le navigant
3.6.1 Traitement géométrique
3.6.2 Traitement sémantique
3.7 Prise en compte de l'état des espaces et transitions
3.7.1 Cadre général : départ immédiat et états stables
3.7.2 Cas particuliers de départs planifié en situation instables
3.8 Génération de chemin
3.9 Conclusion

3.1 Introduction

Ce chapitre présente l'approche proposée, intitulée BiMov, pour la planification automatique de chemin intérieur dans des bâtiments complexes. Dans BiMov, la recherche de chemin est structurée autour de 3 niveaux de graphes de navigation : Macro, Externe et Interne. Le graphe de navigation de niveau Macro explicite la représentation topologique de l'intérieur d'un bâtiment, en établissant un graphe de connectivité de tous les espaces intérieurs ; ce niveau permet entre autres aux architectes, lors de la conception du bâtiment, de vérifier l'accessibilité de tous les espaces. Le graphe de navigation de niveau Externe explicite les chemins possibles entre les espaces intérieurs, permettant d'éviter les obstacles structurels que représentent notamment les murs et les poteaux. Le graphe de navigation au niveau Interne permet d'expliciter les chemins que peut effectivement emprunter un navigant donné, en lui permettant d'éviter les obstacles conjoncturels situés à l'intérieur des espaces, tels que du mobilier ou des machines. Les graphes de navigation aux niveaux Externe et Interne doivent être réduits pour prendre en compte les caractéristiques de chaque navigant (encombrement physique, aptitude et limite de déplacement, habilitation), ainsi que l'état opérationnel de chaque espace ou transition (fermé/ouvert, en arrêt, en maintenance).

Ce chapitre est structuré comme suit : une première section présente l'architecture générale de BiMov et introduit les grandes phases de la méthode de planification de chemin. Ensuite, les différents cas d'utilisation du système sont précisés et les prin-

cipaux concepts sont définis et structurés dans un diagramme de classes. Ceci permet de décrire les différents modèles de données sur lesquels BiMov est structuré. Par la suite, l'approche utilisée pour prendre en compte les caractéristiques géométriques et non géométriques des navigants est explicitée. La méthode suggérée pour prendre en compte l'aspect dynamique de l'accessibilité des espaces et des transitions est ensuite décrite. Une dernière section précise la méthode de recherche du chemin optimal, pour un navigant donné et dans un état temporel donné du système, en s'appuyant sur les différents modèles de graphes. Une conclusion rappelant les principaux éléments de la méthode BiMov vient enfin clôturer ce chapitre.

3.2 Architecture du système BiMov

Le système BiMov s'attache à répondre à la problématique de planification de chemin intérieur dans un bâtiment potentiellement complexe, caractérisé par des nombreux espaces, la présence de zones dangereuses avec des restrictions d'accès, en tenant compte du profil des navigants et du caractère dynamique de l'accessibilité des espaces.

La méthode de recherche de chemin dans BiMov est illustrée par la Figure 38 ci-dessous. Il s'agit, dans un premier temps, d'extraire du modèle de bâtiment les éléments pertinents pour la planification de chemin. Il s'agit ensuite d'analyser les éléments extraits et leurs interrelations avec d'autres, du point de vue géométrique et sémantique, afin d'expliciter les relations spatiales rendant un cheminement possible entre les espaces (voisinage). Puis, la méthode construit les 3 modèles de graphe. La première, nommée Macro, représente l'ensemble des connexions entre espaces voisins et permet aux architectes de vérifier l'accessibilité de tous les espaces. Le deuxième, nommé Externe, représente la connexion entre les espaces voisins au travers de leurs transitions communes. Ce modèle explicite des chemins qui peuvent être qualifiés d'abstraits, dans la mesure où l'absence de profil de navigant ne permet pas de savoir s'ils peuvent être empruntés ou non. Un modèle plus précis et plus circonstancié, destiné à vérifier l'accessibilité effective des espaces par un navigant donné s'avère nécessaire. Dans un premier temps, seules les transitions sont vérifiées vis-à-vis du navigant considéré, d'où le nom de graphe Externe (un élément externe, le navigant, est utilisé pour déterminer si un espace est atteignable par ce navigant, mais sans prendre en compte l'intérieur de l'espace pour le moment). L'état d'accessibilité de l'espace peut néanmoins être pris en compte sur ce modèle de graphe. La double vérification (caractéristiques de navigant vis-à-vis des transitions menant aux espaces + état de chaque espace) donne un graphe Externe réduit, sur lequel on peut se baser pour rechercher un chemin possible pour un navigant donné à un moment donné. Le troisième modèle de graphe, nommé Interne, est le plus précis du système BiMov. C'est un graphe densifié généré à partir d'un maillage aléatoire de l'intérieur de

chaque espace, et de chaque transition, afin de rechercher un chemin précis empruntable par un navigant donné, à un moment donné, en évitant les obstacles intérieurs (meubles, machines). Le graphe densifié, qui fournit potentiellement un vaste choix de chemins, est ensuite réduit pour déterminer un chemin optimal selon des critères à définir.

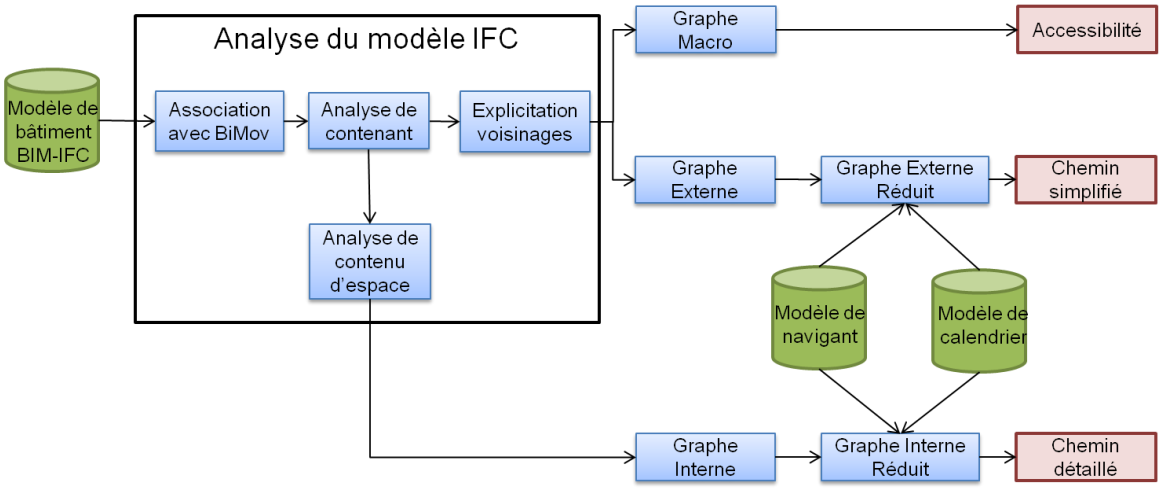


Figure 38 : Workflow du système BiMov

Les caractéristiques du navigant sont extraites d'un modèle de navigant externe à BiMov, qui représente l'ensemble des caractéristiques de navigant utiles pour la planification de chemin, telles que son encombrement physique, ses habilitations, ses aptitudes et limites au déplacement. L'état d'accessibilité des espaces est extrait d'un modèle de calendrier externe à BiMov, dans lequel seront répertoriées les interventions planifiées ou constatées.

3.3 Analyse d'exigence du système BiMov

L'analyse d'exigence est une étape importante dans le cycle de vie d'un projet puisqu'elle représente le niveau de compréhension des besoins et des attentes du client par rapport au système proposé. Les formalismes UML (Unified Modelling Language) sont utilisés pour décrire les fonctionnalités attendues du système BiMov.

3.3.1 Les cas d'utilisation du système BiMov

L'objectif des cas d'utilisation est de formaliser les services que doit assurer le système. Cela permet de mettre en évidence les relations fonctionnelles entre les acteurs offrant ou bénéficiant des services du système et le système étudié.

BiMov a pour but d'aider à planifier un chemin intérieur en phase de conception et d'exploitation d'un bâtiment. On peut distinguer deux scénarios principaux en relation avec ces phases du cycle de vie du bâtiment :

- Le scénario de vérification de l'accessibilité des espaces en phase de conception. Dans ce scénario, le client principal est l'architecte ou l'ingénieur, qui doit valider la conformité du bâtiment en termes d'accessibilité,
- Le scénario de planification de chemin pour guider un visiteur dans un bâtiment en phase d'exploitation. Dans ce scénario, le client principal est le navigant, pour lequel un chemin optimal doit être trouvé en tenant compte de ses caractéristiques et de l'état des espaces au moment du déplacement.

Les acteurs principaux du système sont les suivants :

- Les utilisateurs bénéficiant des services du système (architecte ou visiteur),
- Les gestionnaires contribuant à offrir les services, qui auront à gérer le calendrier des états des espaces et transitions, et les données caractéristiques des navigants susceptibles de circuler dans le bâtiment.

3.3.1.1 *Point de vue utilisateur*

La conception architecturale d'un bâtiment est un travail itératif. Pour chaque version ou itération, l'architecte doit assurer la qualité de la conception en termes d'accessibilité, aux différentes zones, espaces, étages du projet, en vérifiant qu'il n'existe aucun espace ou étage isolé. Ce travail s'opère en général de manière visuelle sur la base du modèle de bâtiment en 3D ou de sections étage par étage. Durant cette tâche, le vérificateur ne cherche pas vraiment à trouver de chemins entre les espaces, mais juste à vérifier si tous les espaces sont connectés. Une automatisation de cette vérification fait partie des services que BiMov doit pouvoir proposer à l'architecte.

Durant la phase d'exploitation, d'un bâtiment, BiMov propose d'aider un navigant à planifier son chemin. Le bénéficiaire du service devrait pouvoir être identifié (d'une manière quelconque, comme une inscription au service) et exprimer son besoin de déplacement au sein d'un bâtiment connu de BiMov. Il devrait pouvoir spécifier un point de départ (ou être localisé dans un bâtiment connu au moyen des technologies listées au chapitre 1) et préciser un point d'arrivée dans le même référentiel, puis préciser la date et l'heure de son départ (immédiatement ou de manière planifiée).

Concernant la gestion du temps, BiMov propose d'offrir des fonctionnalités optionnelles telles que l'heure de départ qui est par défaut « dès maintenant », l'heure actuelle lorsque l'utilisateur lance la recherche de chemin, ou bien « plus tard » lorsque l'utilisateur planifie un chemin pour une date ultérieure, mais aussi de prendre en compte ou pas les changements de l'état de l'espace et des transitions qui peuvent survenir durant le trajet du navigant, de manière à intégrer les changements d'état. Enfin, l'utilisateur de BiMov doit pouvoir prendre connaissance du chemin à emprunter (Figure 39).

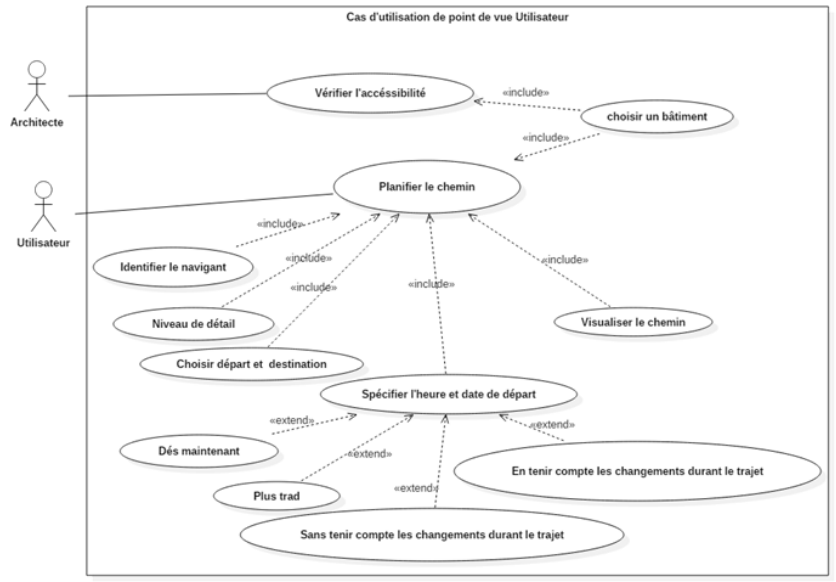


Figure 39 : Cas d'utilisations du point de vue des navigants

3.3.1.4 Point de vue des gestionnaires

BiMov a besoin de deux modèles de données externes qui décrivent les caractéristiques du profil de navigant, ainsi que la liste des événements qui vont se dérouler dans le bâtiment et qui influencent la planification de chemin. Pour cela, il est nécessaire de considérer l'existence d'un ou de plusieurs gestionnaires chargés de maintenir ces modèles de données. Concernant le modèle de navigant, le gestionnaire sera amené à ajouter, supprimer et éditer les caractéristiques des navigants. Pour le modèle de calendrier, le gestionnaire est chargé d'ajouter, supprimer et éditer des événements planifiés impactant l'accessibilité des espaces et transitions (Figure 40).

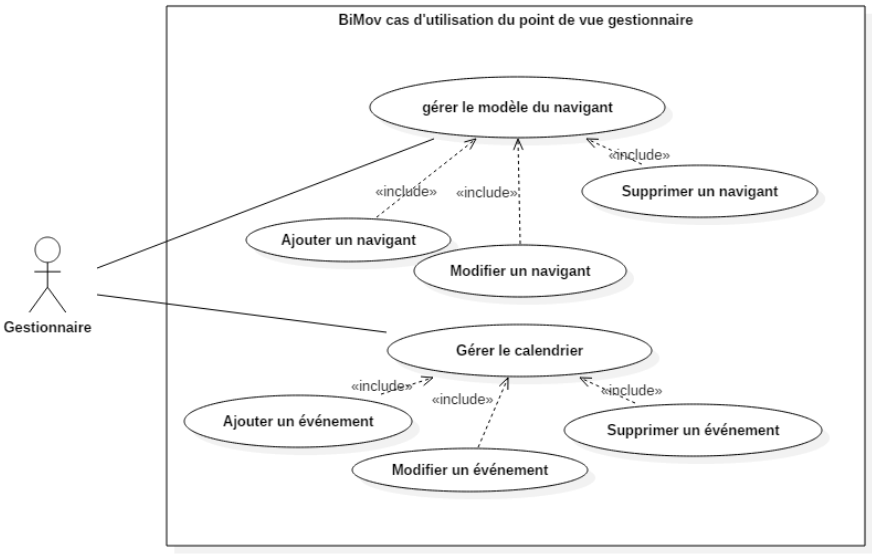


Figure 40 : Cas d'utilisations du point de vue des gestionnaires

3.3.2 Diagramme de classe de BiMov

Le diagramme de classes est considéré comme le plus important d'une modélisation orientée objet et il est le seul obligatoire lors d'une telle modélisation destinée à préciser les concepts clés et leurs relations. Si le diagramme de cas d'utilisation montre le système selon les points de vue des acteurs, le diagramme de classe en montre la structure interne, orientée développeur. Il permet de fournir une représentation abstraite des concepts et de leurs relations pour réaliser les cas d'utilisation.

Dans BiMov, la classe bâtiment est une agrégation d'étages et elle est connectée avec l'extérieur de bâtiment. Chaque étage est composé d'espaces intérieurs, de transitions horizontales, verticales et d'obstacles. Les espaces intérieurs sont délimités par au moins un mur et peuvent contenir des meubles et des équipements. La transition horizontale est une généralisation de toutes les classes sémantiquement associées à une possibilité de déplacement horizontal entre 2 espaces, comme les classes portent, ouverture et fenêtre, qui sont elles-mêmes associées à la classe mur par une relation de contenance (le mur contient ces transitions). De manière similaire, la transition verticale est une généralisation de toutes les classes sémantiquement associées à une possibilité de changement d'étage, comme les classes escalier, ascenseur ou rampe. Chaque classe est caractérisée par des attributs, qui portent des informations sémantiques et géométriques associées à chaque classe, telles que le nom, l'identifiant, le type, etc. Toutes ces classes contribuent à définir les caractéristiques des bâtiments utiles pour y rechercher un chemin (Figure 41).

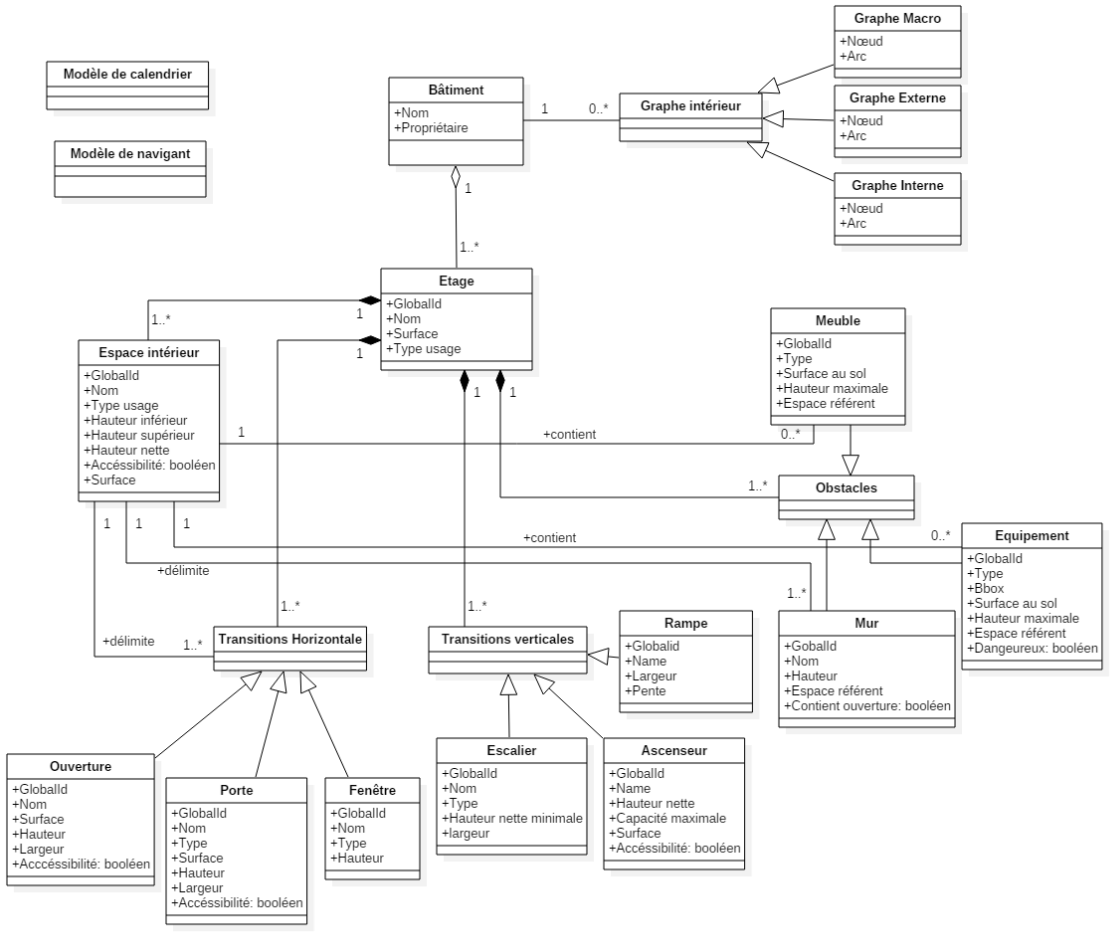


Figure 41 : Diagramme de classes de BiMov

Trois classes supplémentaires et originales sont proposées dans le système BiMov. La classe graphe_intérieur, qui est une généralisation des différents modèles de graphes (Macro, Externe et Interne), une classe qui représente le concept de navigant, munie des attributs permettant de répertorier ses caractéristiques utiles pour planifier un chemin, et enfin une classe calendrier qui est chargé de répertorier les états conjoncturels des espaces.

3.4 Modèles de données de BiMOV

Le diagramme de classes de la section précédente révèle la présence de 4 principaux modèles de données utiles à BiMov (Figure 42) :

1) Un modèle de bâtiment chargé de fournir toutes les informations géométriques et sémantiques de l'environnement à parcourir,
2) Un modèle de graphe à plusieurs niveaux de détail pour représenter le référentiel de mobilité,

3) Un modèle des différents profils de navigants, pour adapter l'itinéraire à leurs aptitudes au déplacement,
4) Un modèle de calendrier pour renseigner BiMov sur l'état des espaces et transitions et rendre le système dynamique.

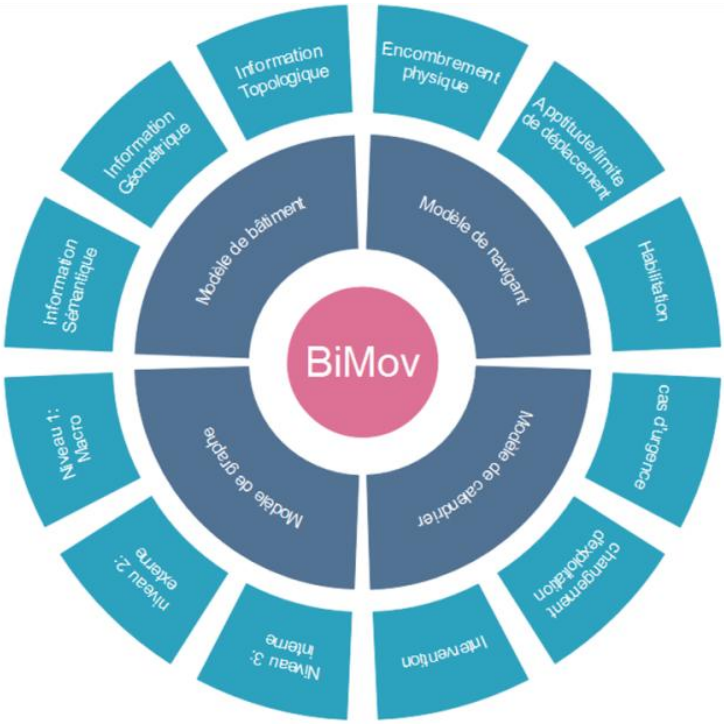


Figure 42 : Les modèles de données de BiMov

Ces différents modèles sont détaillés dans les sections suivantes.

3.4.1 Modèle de bâtiment

Cette section décrit le modèle du bâtiment, qui représente le point d'entrée du système BiMov. Ce modèle est spécifiquement conçu pour représenter les environnements intérieurs à des fins de planification de chemin. Les classes fondamentales du modèle du bâtiment de BiMov sont : la classe Espace intérieur, la classe Transition Horizontale, la classe transition Verticale, la classe Obstacle (Figure 43).

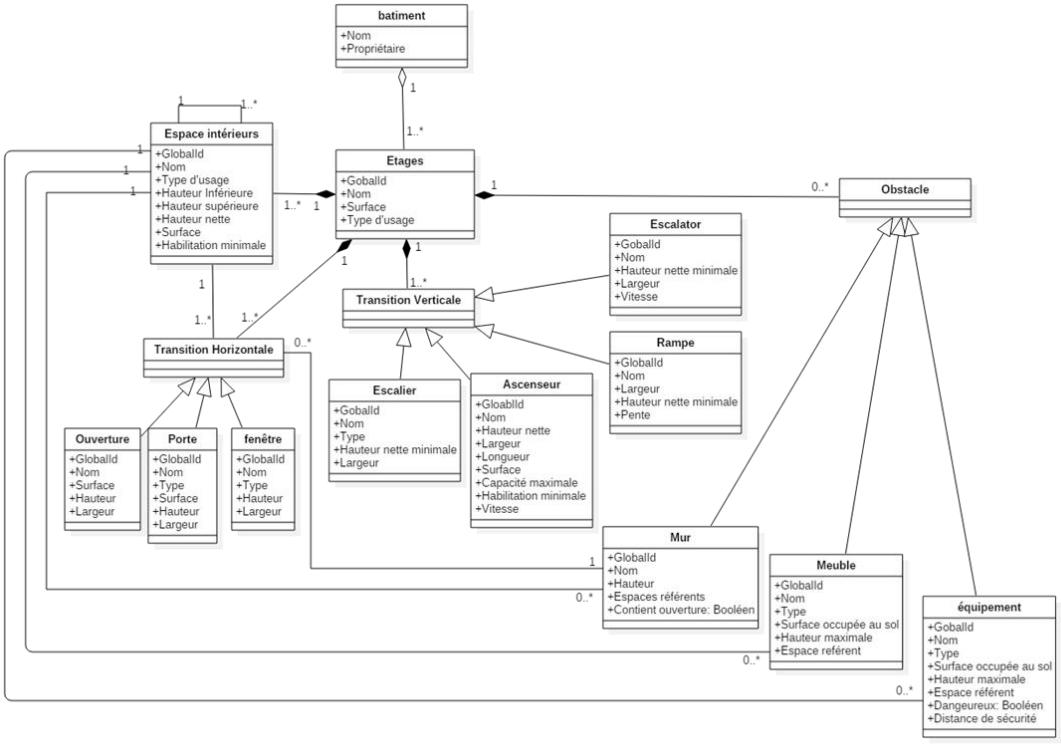


Figure 43 : Modèle de bâtiment de BiMov

Espace Intérieur (Esp) : Les espaces sont conçus pour protéger les biens et les personnes, assurer la circulation des personnes ou des objets mobiles. L'espace intérieur est donc fondamental pour la planification de chemin intérieur. Un espace dans BiMov est représenté par un volume 3D délimité par des éléments de construction tels que les murs, les dalles, les portes, etc. Les espaces sont associés à un étage dans un bâtiment.

La classe Esp a pour attributs le nom de l'espace, l'identifiant, les hauteurs de l'espace (inférieure et supérieure), la hauteur nette de l'espace, la surface de l'espace, le type d'usage de l'espace, ainsi que l'habilitation minimale requise pour y accéder. Cette habilitation peut être représentée par un vecteur Ha (X) de taille m, dans lequel l'indice référence un profil de navigant et la valeur entière le niveau minimal d'habilitation requis pour pouvoir accéder à cet espace. Si Ha (i) vaut 0, cela signifie qu'un navigant de profil i n'a besoin d'aucune habilitation particulière pour accéder à cet espace.

Transition Horizontale (TH) : une transition horizontale permet de connecter un espace intérieur à ses espaces intérieurs voisins situés au même étage. Une TH permet également de connecter, quand c'est possible, un espace intérieur donné avec l'extérieur. La classe TH est une généralisation des classes Porte, Ouverture et Fenêtre.

Concernant la **classe Porte**, elle véhicule des attributs qui sont à la fois sémantiques et géométriques, tels que le nom de la porte, l'identifiant de la porte, la hauteur et la largeur de la porte, l'accessibilité de la porte (si elle est fermée ou pas), la nécessité d'une clé ou d'un code d'accès (habilitation) pour la franchir. Quatre types de portes sont considérées dans BiMov : porte intérieure, porte de secours, porte d'entrée/sortie et porte-fenêtre. La connaissance du type de porte peut s'avérer utile pour la planification de chemin intérieur. Les portes d'intérieur peuvent connecter des espaces intérieurs entre eux; c'est le cas général. Les portes d'entrée/sortie peuvent connecter les espaces intérieurs avec l'extérieur du bâtiment offrant des possibilités de déplacement vers d'autres bâtiments. Les portes de secours ne sont utilisables qu'en cas d'urgence, pour évacuer le bâtiment, c'est-à-dire si l'on relâche les contraintes d'habilitation d'ordre social. Les portes-fenêtres peuvent connecter les espaces intérieurs avec un extérieur sans issue du bâtiment, comme un balcon ou un jardin clos. Dans une situation d'urgence, certaines portes-fenêtres seraient néanmoins utilisables par les occupants pour s'échapper du rez-de-chaussée, ou par des secouristes pour pénétrer dans le bâtiment d'une manière non conventionnelle.

Concernant la **classe Ouverture**, le cas le plus souvent rencontré est celui d'un mur comportant des ouvertures qui ne soient pas occultées par des portes ou des fenêtres. Cela aussi peut inclure les cas où aucune limite physique n'est matérialisée entre deux espaces intérieurs voisins. C'est ce qui se produit, par exemple, lorsqu'une cloison mobile est enlevée, ce qui crée une ouverture entre deux espaces intérieurs qui n'en forment alors plus qu'un. Une porte de contrôle d'accès, comme on en rencontre dans les aéroports, serait ainsi considérée comme une ouverture dans BiMov. La classe ouverture contient des attributs pour caractériser une ouverture telle que le nom, l'identifiant, la hauteur et la largeur.

La **classe Fenêtre** est un élément de construction qui permet de fermer une ouverture verticale ou inclinée. Dans certains cas, une fenêtre peut être considérée comme une transition horizontale. Un drone dûment autorisé devrait pouvoir accéder de l'intérieur vers l'extérieur en franchissant une fenêtre ouverte. En cas d'urgence, les occupants du rez-de-chaussée devraient pouvoir évacuer le bâtiment en passant par les fenêtres et les intervenants accéder à l'intérieur du bâtiment par le chemin inverse. Les attributs qui caractérisent la classe fenêtre sont : le nom, l'identifiant, la hauteur et la largeur de la fenêtre.

Transition verticale (TV) : une transition verticale permet de connecter certains espaces intérieurs à d'autres espaces intérieurs, situés à des étages différents. La classe TV est une généralisation des classes Escalier, Ascenseur, Escalator et Rampe.

La **classe Escalier** est un passage vertical qui permet d'accéder en marchant aux différents niveaux du bâtiment. Les attributs qui caractérisent la classe Escalier sont : le

nom, l'identifiant, le type d'escalier (escalier droit, tournant, hélicoïdal, etc.), la hauteur minimale entre deux volées d'escalier et la largeur d'escalier.

La **classe Ascenseur** est une installation permettant de transporter des personnes et des objets verticalement dans les bâtiments. Les attributs qui caractérisent la classe Ascenseur sont : le nom, l'identifiant, la hauteur nette, la surface, la longueur, la largeur, la capacité maximale en masse, la vitesse linéaire (pour pouvoir calculer, le moment venu, la durée de déplacement vertical d'un navigant, celui-ci se voyant affecter provisoirement la vitesse de l'ascenseur), ainsi que l'habilitation minimale pour accéder à cet ascenseur.

La **classe Rampe** représente une voie inclinée reliant deux dalles situées à des niveaux différents. Les attributs qui caractérisent la classe Rampe sont : le nom, l'identifiant, la largeur et la pente de la rampe.

La **classe Escalator** représente un escalier mécanique qui a la même fonction qu'un escalier, mais qui véhicule le navigant qui l'emprunte. Les attributs qui caractérisent la classe Escalator sont : le nom, l'identifiant, la hauteur minimale entre deux volées d'escalator, la largeur, ainsi la vitesse de l'escalator pour calculer la durée de déplacement vertical du navigant qui l'emprunte.

Obstacle : un obstacle est une zone non navigable, car occupé par un objet physique réputé fixe (structurellement ou conjoncturellement). Cet objet peut être un élément de construction comme un mur, un poteau, une cloison, etc. ou bien un élément de mobilier ou un équipement intérieur encombrant. La classe obstacle est une généralisation de la classe mur, poteau, ameublement et équipement.

La **classe Mur** est un élément de structure verticale qui permet de déporter les charges verticales vers les dalles porteuses et de séparer les espaces. La zone occupée par un mur est un espace inaccessible pour le navigant. Les attributs associés à la classe mur sont : le nom, l'identifiant, la hauteur, l'emplacement par rapport au bâtiment (externe ou interne), l'emplacement par rapport aux espaces (les espaces délimités par le mur), la contenance du mur (contient des ouvertures, des porte, des fenêtres).

La **classe Meuble** représente les ameublements intérieurs dans les espaces comme les canapés, les chaises, les tables qui sont aussi considérés comme des obstacles pour la planification de chemin. Les zones occupées sont non navigables. Les attributs associés à cette classe sont le nom, l'identifiant, la surface de l'empreinte au sol de l'objet, la hauteur maximale de l'objet, ainsi que l'espace dans lequel elles ont présentes.

La **classe Equipement** représente les installations intérieures comme les cheminées, les chauffages, les machines, etc. Comme pour les meubles, toutes les zones occupées par les équipements sont non navigables. Les 2 classes (Meuble et Equipement)

sont identifiées séparément afin d'introduire la notion de zone de dangers dans le processus de BiMov, dans la mesure où certaines installations intérieures peuvent représenter des zones de danger qui repoussent les bornes physiques de parcours sans danger à proximité des équipements. Par exemple, une chaudière repousse la distance minimale de sécurité pour circuler à proximité de ces installations, comme le suggère le guide de circulation dans les entreprises ("INRS-Le guide de la circulation en entreprise," 2010). Les attributs associés à cette classe sont : le nom, l'identifiant, la surface de l'empreinte au sol de l'installation, la hauteur maximale de l'installation, l'espace de référence, la notion de danger (booléen : installation dangereuse ou pas) et la distance minimale de circulation en sécurité.

3.4.2 Modèle de navigant

L'encombrement réel du navigant et sa fonction sont déterminants pour rechercher un chemin intérieur qui lui convienne, comme l'illustrent les cas d'un agent de maintenance qui pilote un engin ou un personnel d'aéroport qui convoie un chariot de bagages (Figure 44).

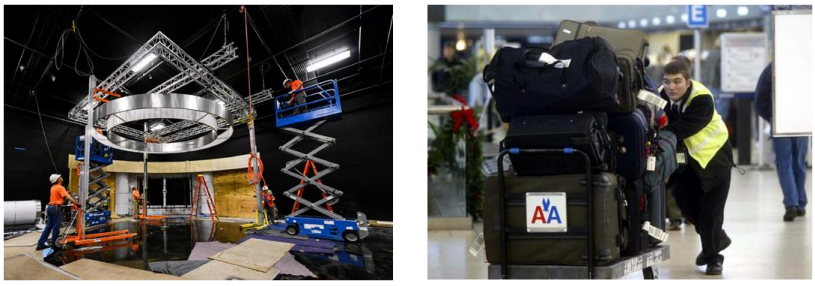


Figure 44 : Manutention d'équipement intérieur et transport encombrant

Cette section décrit le modèle de navigant proposé dans BiMov pour répondre à ces besoins. BiMov considère 3 familles de navigants susceptibles de circuler à l'intérieur du bâtiment : (1) les navigants se déplaçant en marchant au sol comme les humains, les animaux, les robots mobiles humanoïdes; (2) les navigants roulant comme les transpalettes, les trottinettes, les chariots élévateurs, les handicapés moteurs, les robots sur roulettes ou chenilles; (3) les navigants volant comme les drones.

En dépit des différences qui caractérisent les aptitudes respectives de ces 3 familles, BiMov aborde la question de manière générique grâce à un modèle de navigant se focalisant sur les informations nécessaires à la décision d'autoriser ou pas qu'il emprunte un espace ou une transition. Les éléments fondamentaux à considérer sont les cotes d'encombrement en longueur, largeur et hauteur du volume englobant du navigant (au moins dans une première approximation), mais aussi d'autres informations qui valident ou non les possibilités de navigation, comme l'aptitude au déplacement longitudinal (Tx), latéral (Ty) ou vertical (Tz), l'aptitude à la rotation et le rayon de braquage autour des axes (Rx), (Ry) et (Rz), la masse déplacée (M), la pente maxi-

male admissible (P), l'aptitude à gravir un escalier (S), la vitesse de déplacement (V), ainsi que l'habilitation selon plusieurs critères. En effet, un visiteur bipède n'a pas les mêmes habilitations qu'un personnel bipède, les agents de maintenance électrique bénéficient d'habilitations exclusives pour accéder à certains espaces, comme l'explique la norme NF C18-510 qui définit les différents symboles d'habilitation en fonction du domaine de tension et de la nature de l'intervention. Le niveau d'habilitation est représenté, dans la modèle du navigant de BiMov, par un vecteur Ha (X) qui dépend du profil, de la fonction, du niveau hiérarchique… du navigant amené à se déplacer. Les caractéristiques du modèle de navigant sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 4).

Tableau 4 : Caractéristiques pertinentes de navigant

	Type	Descriptions
L	Longueur en mm	Dimension longitudinale de sa boîte englobante (selon le X navigant).
l	Longueur en mm	Dimension transversale de sa boîte englobante (selon le Y navigant).
H	Longueur en mm	Dimension verticale de sa boîte englobante (selon le Z navigant).
Tx	Booléen	Aptitude au déplacement suivant l'axe X du navigant (V/F)
Ty	Booléen	Aptitude au déplacement suivant l'axe Y du navigant (V/F)
Tz	Booléen	Aptitude au déplacement suivant l'axe Z du navigant (V/F)
Rz	Longueur en mm	Rayon de lacet, ou -1 si le lacet n'est pas autorisé
Rx	Longueur en mm	Rayon de roulis, ou -1 si le roulis n'est pas autorisé
Ry	Longueur en mm	Rayon de tangage, ou -1 si le tangage n'est pas autorisé
M	Masse en kg	La masse en pleine charge
P	Angle en deg	La pente maximale autorisée pour un déplacement incliné
S	Booléen	Aptitude à emprunter un escalier (V/F).
V	Vitesse en m/s	Vitesse de navigation
Ha []	Vecteur de réels (% du maximum)	Ensemble d'habilitations à circuler, en référence à une liste reconnue.

Pour les objets navigants (chariots, transpalettes, robots mobiles...), ces informations peuvent être extraites d'un modèle CAO, d'abaques industriels ou du catalogue du fabricant. Concernant les navigants humains, les dimensions du percentile 75 (par exemple) de la population considérée peuvent être prises comme référence.

Une distance D est associée à chaque navigant pour synthétiser son encombrement physique selon une section plane horizontale. Cette distance dépend des dimensions physiques de navigant (L, l et H), ainsi que de sa capacité au déplacement (Tx, Ty, Tz) et au virage (Rx, Ry, Rz). Dans le cas d'un navigant marchant ou roulant (lorsque la rotation autour de X et Y est bloquée), la distance de décalage D peut être calculée à partir des dimensions longitudinales (L) et transversales (l) et du rayon de lacet minimum, si l'objet peut pivoter dans le plan XY. D vaut alors la moitié de la largeur balayée (Lb) lorsque le navigant effectue un lacet de rayon minimal. En effet, il suffit que le navigant s'éloigne d'une distance Lb/2 de tous les obstacles, pour le placer en situation d'évitement de collision avec ces obstacles. Si l'on désigne par Rin le rayon intérieur de la zone balayée et par Rex le rayon extérieur, alors Lb vaut Rex – Rin (les dimensions sont en mm ou en mètre).

Équation 1 : Calcul de distance D

$$D = \frac{Lb}{2} = \frac{\mathrm{Re}\,x - Rin}{2}$$

$$Rin = Rb - \frac{l}{2}$$

$$\mathrm{Re}\,x = \sqrt{\left(\left(Rb + \frac{l}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2\right)}$$

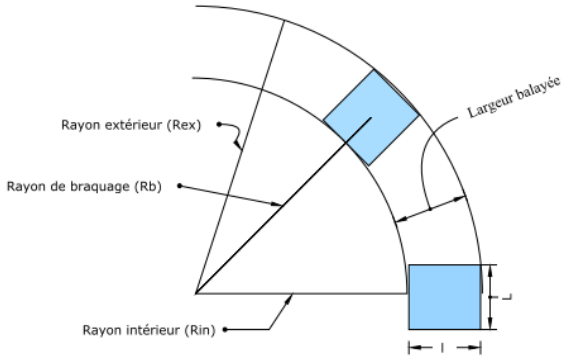


Figure 45 : Largeur balayée lors d'un lacet

Si le navigant peut se déplacer latéralement (Ty autorisé), la distance D vaut :

$$\mathrm{D} = \min\left\{\left(\frac{\mathrm{Lb}}{2}\ \text{suivant Tx}\right);\ \left(\frac{\mathrm{Lb}}{2}\ \text{suivant Ty}\right)\right\}$$

Dans le cas du drone, le navigant peut pivoter autour des axes X, Y et Z. Pour cela la distance D vaut :

$$\mathrm{D} = \max\{(\mathrm{Dxy});(\mathrm{Dxz});\ (\mathrm{Dyz})\}$$

3.4.3 Modèle de calendrier

Les environnements intérieurs peuvent subir des changements temporaires en phase d'exploitation. Ces changements impactent la circulation au sein de ces environnements.

Pour aborder l'aspect dynamique des possibilités de déplacement intérieur, BiMov se base sur un modèle de calendrier externe, qui fournit en permanence l'état instantané et planifié des espaces et des transitions horizontales et verticales. Ce modèle de calendrier répertorie les interventions de maintenances sanitaires ou électriques, la présence temporaire d'équipements qui peuvent bloquer une zone habituelle de passage comme l'entreposage ou la livraison de matériels, les horaires des fermetures réglementées dans un établissement public (l'établissement peut être ouvert à la circulation alors que certains services sont fermés au public).

Ce modèle de calendrier permet de faire le lien entre des informations relatives aux constituants du bâtiment, telles que le nom et l'identifiant des espaces et des transitions concernées d'une part, et des informations relatives aux événements qui en impactent l'accessibilité.

Pour chaque événement, le modèle de calendrier mémorisera les éléments suivants :

- Type : type de l'événement (maintenance, fermeture, incident…),
- Intervenant : les profils d'intervenants autorisés à accéder malgré l'événement,
- L'emplacement : les espaces et transitions du bâtiment affectés par l'évènement,
- Date : les dates et heures de début et de fin prévisible de l'événement,
- Répétition : si l'événement doit se répéter, comme c'est le cas des horaires d'ouverture.

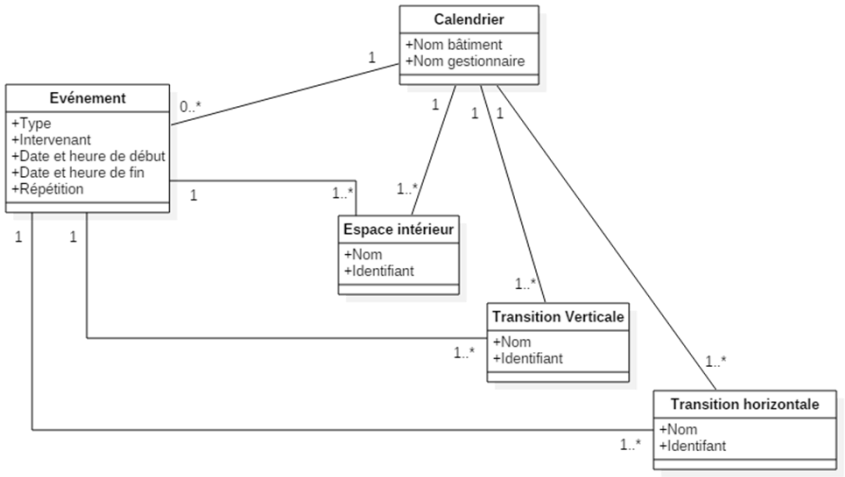


Figure 46 : Modèle de calendrier

Le calendrier est destiné à être géré par un ou plusieurs administrateurs (humains ou automates), notamment chargés d'ajouter de nouveaux évènements en spécifiant les caractéristiques pertinentes, de modifier ou de déplacer des évènements dans les temps ou l'espace. Le calendrier est couplé et synchronisé avec les graphes de navigation par le biais des identifiants des espaces et transitions.

3.4.4 Modèles de graphes

BiMov analyse l'environnement intérieur du bâtiment et le transforme en graphes de navigation plus ou moins détaillés, selon le besoin. En mathématique, un graphe est en ensemble des nœuds et d'arcs reliés entre eux lorsqu'une relation existe. En planification de chemin, un graphe est une représentation implicite de l'environnement intérieur. Ce modèle permet de représenter les configurations libres de l'environnement intérieur et de relier ces configurations par des arcs lorsqu'une relation topologique existe entre deux configurations libres.

BiMov utilise 3 modèles de graphes présentant différents niveaux de précision :

Niveau 1 Macro : le graphe macro $G_{macro}= \{V_{macro} ; E_{macro}\}$ où V_{macro} est l'ensemble des nœuds représentant les espaces intérieurs, et $E_{macro}= \{e= (n_i, n_j)| (n_i, n_j \in V_{macro})$ et (n_i, n_j sont les espaces qui partagent une transition verticale ou horizontale)}.

Ce modèle représente un graphe de connectivité de l'espace intérieur. Les nœuds représentent les centres de gravité des espaces et les arcs représentent les connections entre espaces, lorsqu'il existe une relation topologique entre eux (Figure 47).

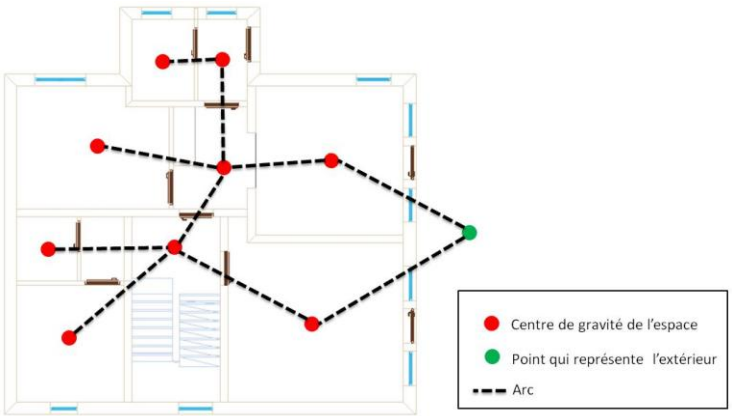


Figure 47 : Modèle de graphe de niveau 1 «Macro»

Ce modèle est le moins précis de BiMov; les arcs ne représentent pas des chemins réellement praticables entre les espaces, dans la mesure où ils traversent les murs. C'est un modèle topologique qui connecte les espaces voisins visitables de l'un à l'autre, dont l'utilité principale est liée au travail de vérification d'accessibilité des espaces par l'architecte lors de la conception du bâtiment.

Niveau 2 externe : le graphe externe $G_{externe}= \{V_{externe} ; E_{externe}\}$ où $V_{externe}$ est l'ensemble des nœuds représentant les espaces intérieurs, ainsi que les transitions verticales et horizontales, et $E_{externe}= \{e= (n_i, n_j) \mid (n_i, n_j \in V_{externe})$ et (n_i, n_j sont l'espace et la transition horizontale ou verticale associée à cet espace)}.

Le modèle de graphe Externe est plus précis que le modèle de graphe Macro. Les espaces et les transitions verticales et horizontales sont représentés par des nœuds, tandis que les arcs représentent les liaisons entre les espaces d'une part et les transitions qui desservent ces espaces d'autre part (Figure 48). Ainsi, en parcourant un graphe Externe, on passe d'un espace à une transition visible de cet espace, puis de cette transition à un espace voisin du premier par l'intermédiaire de la transition.

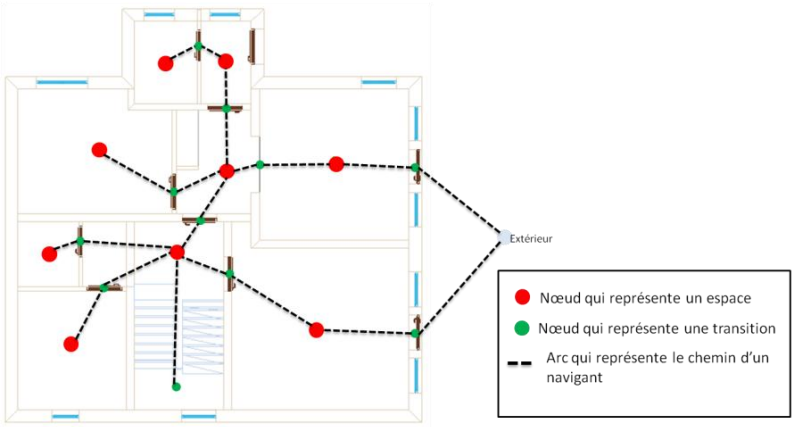


Figure 48 : Modèle de graphe de niveau 2 «Externe»

L'utilité de ce modèle plus précis est de permettre une vérification de la possibilité, pour un navigant donné, de passer d'un espace à un autre en franchissant la transition qui les connecte. Quand il s'agit d'un navigant marchant ou roulant au sol et pour plus de précision, les nœuds et les arcs sont projetés sur le plan du sol. S'il s'agit d'un navigant volant, les nœuds restent positionnés aux centres de gravité, soit de l'espace, soit de la transition.

Niveau 3 interne : le graphe interne $G_{interne} = \{V_{interne} ; E_{interne}\}$ où $V_{interne}$ est l'ensemble des nœuds générés par le maillage et $E_{externe}= \{e= (n_i, n_j) \mid (n_i, n_j \in V_{interne})$ et (n_i, n_j sont les nœuds voisins accessibles dans le maillage)}.

Le modèle de graphe interne est le plus précis de BiMov. Dans celui-ci, les espaces et les transitions sont discrétisés en un maillage aléatoire composé de nœuds internes, et d'arcs internes représentant les liaisons entre les nœuds les plus voisins (Figure 49).

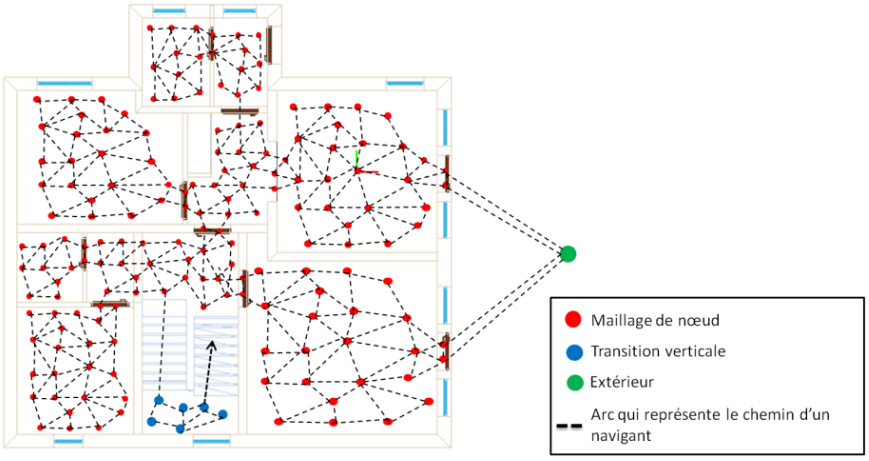


Figure 49 : Modèle de graphe de niveau 3 «Interne»

Le but de ce modèle est pouvoir y rechercher un chemin interne (au sein même d'un espace ou d'une transition) permettant au navigant de se déplacer à l'écart du contenu encombrant de cet espace ou de cette transition.

3.5 Construction des graphes

La tâche essentielle lors de la construction d'un graphe consiste à définir les arcs qui relient les nœuds du graphe. Dans le cas de BiMov, les arcs correspondent à des relations spatiales entre les espaces et les transitions, qu'elles soient horizontales ou verticales.

BiMov utilise 3 modèles de graphes : Macro, Externe et Interne. Pour construire les graphes au niveau Macro et externe, BiMov explicite les relations de voisinage entre les espaces, en interprétant les informations sémantiques, géométriques et topologiques présentes dans le modèle de bâtiment. Au niveau interne, BiMov exploite un algorithme permettant d'identifier les nœuds voisins au sein du maillage de l'intérieur de chaque espace.

3.5.1 Explicitation des relations de voisinage entre espaces

Contrairement aux environnements extérieurs, durant la planification de chemin dans les environnements intérieurs, il est important de faire la différence entre un navigant qui va se déplacer horizontalement c'est-à-dire dans le même étage, ou bien verticalement, s'il s'agit d'un déplacement entre étages. Le concept de voisinage est similaire qu'il s'agisse de déplacement horizontal ou vertical, à ceci près que pour un déplacement horizontal, le navigant ne pourra passer que d'un espace à un espace immédiatement voisin, alors que pour une transition verticale un espace accessible par un escalier ou un ascenseur sera réputé voisin de tous les autres espaces accessibles par la transition. Mais dans les deux cas, horizontal et vertical, l'algorithme de

construction de graphe cherchera une transition commune entre deux espaces, pour que le navigant puisse circuler entre ces deux espaces via cette transition.

Concernant la navigation horizontale, il est nécessaire de se focaliser sur les transitions horizontales. Deux espaces voisins sont susceptibles d'être parcourus en séquence par un navigant circulant horizontalement, si et seulement si une transition est offerte entre ces deux espaces. Cette transition peut être une porte, une fenêtre ou bien une ouverture. BiMov se base sur l'analyse des frontières de chaque espace intérieur, qui est sont matérialisées par des murs (voiles). La Figure 50 ci-dessous illustre l'algorithme de détection des THs dans BiMov. À partir du modèle de bâtiment, les espaces intérieurs ainsi que les murs sont tout d'abord analysés. Il s'agit dans une première approche, de rechercher les murs communs à deux espaces. Ensuite, si le mur est virtuel, les deux espaces sont considérés comme voisins, dans ce cas la TH est représentée par une ouverture (c'est le cas des espaces ouverts). Si le mur est physique, une troisième condition est appliquée pour vérifier si le mur contient une ouverture. S'il contient au moins une ouverture, les deux espaces sont considérés comme voisins et ils sont connectés directement. Dans ce cas, l'ouverture peut être comblée par une porte, fenêtre ou bien laissée vide. S'il n'existe pas d'ouverture dans le mur physique commun à deux espaces, ceux-ci sont effectivement voisins, mais sans possibilité de passer directement de l'un à l'autre.

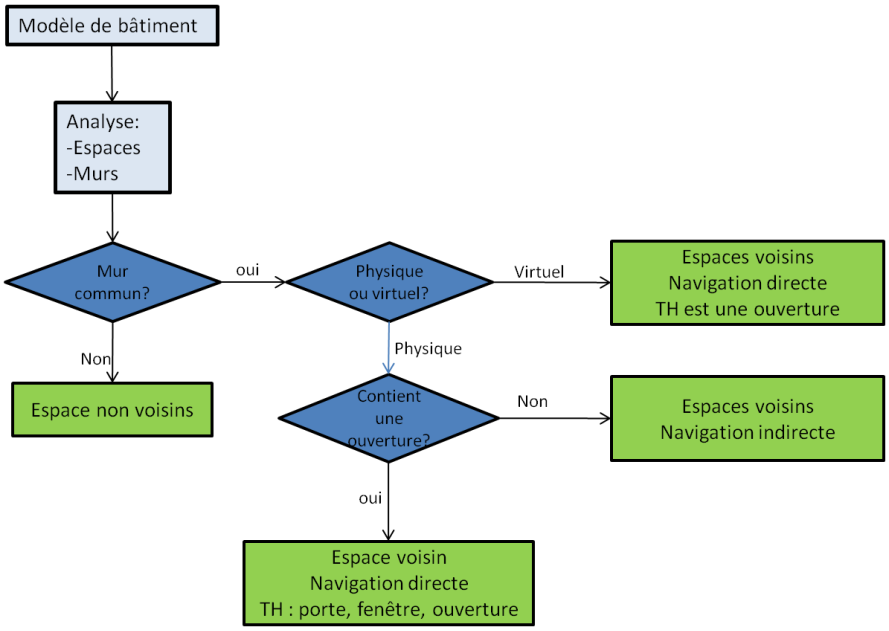


Figure 50 : Voisinage horizontal

Concernant le voisinage vertical, le traitement est différent à celui de voisinage horizontal. En effet, les transitions verticales se situent dans un espace délimité par des murs en béton armé formant une cage (cage d'escalier, d'ascenseur). BiMov cherchera alors à identifier les espaces qui permettent à cette cage de pouvoir connecter les

réseaux de navigation horizontale entre eux. Une vérification géométrique permettant de reconnaître qu'une cage dessert un ou plusieurs espaces situés à des niveaux différents sera nécessaire. Cette vérification sera basée sur les coordonnées des extrémités des TVs (par exemple, les coordonnées des sommets extrêmes du parallélépipède englobant de la cage).

3.5.2 Construction des graphes Macro et Externe

Concernant la construction du modèle de graphe Macro, les nœuds qui représentent les espaces sont attribués des coordonnées des centres de gravité des espaces. Ensuite, en se basant sur les liaisons de voisinage horizontales et verticales définies dans la section précédente, on peut connecter les nœuds par des arcs. La création de toutes ces liaisons résulte en un graphe au niveau Macro.

Au niveau Externe, il est nécessaire d'enrichir le modèle Macro, qui ne relie entre eux que des espaces, par les nœuds qui représentent les transitions. Chaque nœud représentant une transition est attribué des coordonnées de son centre de gravité. Ainsi, un arc qui relie deux espaces au niveau Macro se voit transformé, au niveau Externe, en un nœud intercalaire représentant la transition entre ces nœuds et deux arcs, connectant respectivement la transition à chacun des espaces qu'elle relie.

3.5.3 Construction de graphe Interne

Le graphe de niveau Interne fait apparaître, à l'intérieur de chaque espace, et à l'intérieur de chaque transition, jusqu'alors définis chacun par un seul nœud, un maillage aléatoire de nœuds internes. Dans le cas d'un navigant roulant ou marchant au sol, le maillage de nœuds est un maillage 2D au niveau du sol de l'étage considéré. Les nœuds qui appartiennent à l'empreinte au sol des obstacles rencontrés (murs, colonnes, mobilier ou équipements) sont considérés comme des nœuds non accessibles. Dans le cas d'un navigant volant, le maillage 3D sera généré dans l'ensemble du volume de chaque espace et transition, mais les nœuds de ce maillage inclus dans le volume englobant des obstacles présents seront considérés comme inaccessibles.

Une fois le maillage généré, on peut procéder à la construction du graphe en reliant les nœuds. A ce stade, on ne peut pas se contenter de relier tous les nœuds accessibles entre eux. D'une part, chaque nœud ne doit être relié qu'à ses plus proches voisins, d'autre part le chemin entre 2 nœuds accessibles est susceptible de rencontrer un obstacle. La figure ci-dessous illustre cette situation (Figure 51-1). BiMov propose de parcourir chaque nœud et de construire un périmètre de proximité de rayon R fixé en fonction de la précision désirée. Les nœuds présents dans ce périmètre (circulaire en 2D, sphérique en 3D) seront considérés comme des nœuds voisins. La valeur du rayon R adéquate dépend du type du navigant. Elle est proportion-

nelle à son encombrement physique. Avec cet algorithme, on peut construire un graphe Interne qui évite les obstacles (Figure 51-2)

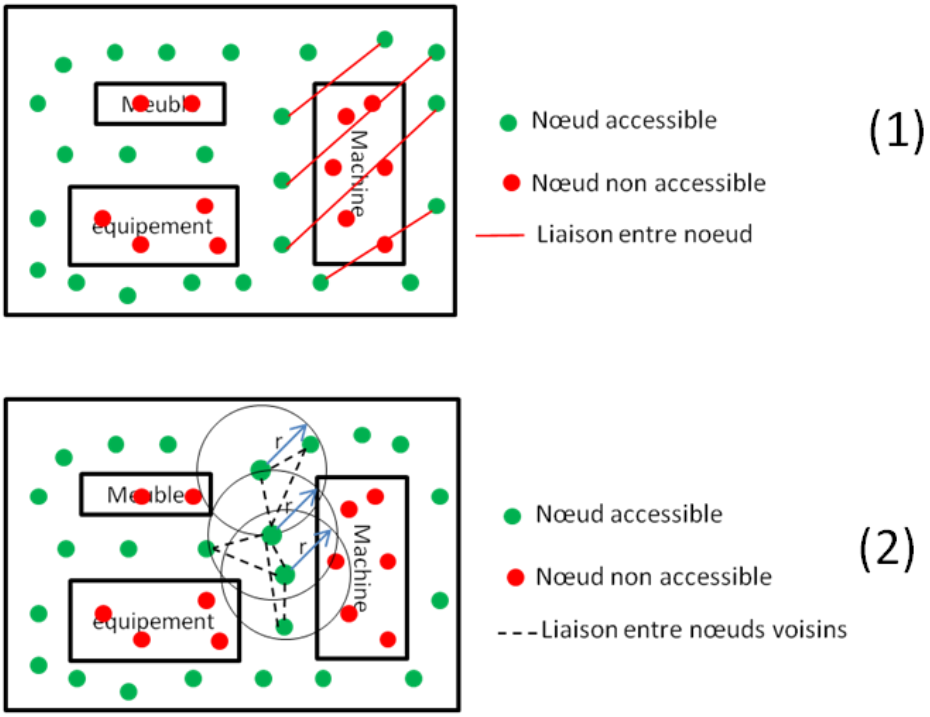


Figure 51 : Principe de détection de nœuds voisins dans le maillage

La densité de maillage dépend à la fois de la taille de l'espace ou de la transition, du type de navigant et du niveau de précision exigé. Si le navigant est de petite taille, il faut un maillage plus dense pour définir précisément l'ensemble des positions où celui-ci est autorisé à évoluer (les nœuds du maillage). Cela augmente le temps de calcul ainsi que le coût de stockage de graphe.

3.6 Restriction de la navigation selon le navigant

Comme indiqué au chapitre 2, la planification de chemin de robots mobiles nécessite de considérer l'encombrement, donc les dimensions du robot. La méthode de Minkowski-Sum a été largement utilisée pour identifier les zones inaccessibles par un tel robot. L'approche utilisée dans BiMov est inspirée de la méthode Minkowski-Sum en ce qui concerne l'encombrement physique du navigant. Il s'agit d'une décomposition de l'espace intérieur entre des zones navigables et non navigables d'un navigant donné. De plus, des ensembles des vérifications non géométriques basées sur des informations sémantiques associées à chaque navigant et aux constituants physiques du bâtiment issus du modèle de bâtiment, permettent de prendre en compte l'aptitude, les limites de déplacement et le niveau d'habilitation du navigant pour restreindre éventuellement ses possibilités d'évoluer dans certains espaces ou transitions.

3.6.1 Traitement géométrique

Un navigant est représenté par un point de référence immatériel situé au centre de gravité G du volume englobant qui le représente. De plus, le navigant est caractérisé par une distance D qui dépend à la fois de ses caractéristiques géométriques, de ses aptitudes à la rotation autour des axes X, Y, Z et des rayons de lacet, roulis et tangage minimaux. Ces caractéristiques ne sont pas exploitées dans le graphe Macro. Elles le sont dans le graphe Externe et le graphe Interne.

Au niveau Externe, seules les transitons verticales et horizontales sont considérées. BiMov applique des ensembles des vérifications basés sur des informations géométriques pour vérifier si un navigant peut franchir une transition verticale ou horizontale. Les points suivants résument ces vérifications géométriques pour les différents types de transitions :

- Cas d'une transition Horizontale : les mêmes vérifications sont appliquées pour les trois types de THs (porte, ouverture ou fenêtre). Il faut que la largeur d'une TH supérieure ou égale 2*D (D étant la distance associée au navigant), et que la hauteur d'une TH soit supérieure ou égale à la hauteur du navigant,

$$L_{TH} \geq 2 \times D$$
$$H_{TH} \geq H_{navigant}$$

- Cas d'une transition Verticale :
  - Cas d'un escalier : il faut que la largeur et la longueur d'un escalier soit supérieures ou égales à 2*D et que la hauteur nette minimale entre deux volées d'escalier soit supérieure ou égale à la hauteur du navigant,

$$L_{escalier} \geq 2 \times D$$
$$l_{escalier} \geq 2 \times D$$
$$H_{nette\ minimale\ escalier} \geq H_{navigant}$$

  - Cas d'un rampe : il faut que la largeur et la longueur d'une rampe soient supérieures ou égales à 2*D et que la hauteur nette minimale soit supérieure ou égale à la hauteur du navigant,

$$L_{rampe} \geq 2 \times D$$
$$l_{rampe} \geq 2 \times D$$
$$H_{nette\ minimale\ rampe} \geq H_{navigant}$$

  - Cas d'un ascenseur : il faut que la largeur et la longueur de l'ascenseur soient supérieures ou égales à 2*D et que sa hauteur soit supérieure ou égale à la hauteur du navigant,

$$L_{ascenseur} \geq 2 \times D$$
$$l_{ascenseur} \geq 2 \times D$$
$$H_{ascenseur} \geq H_{navigant}$$

Les informations géométriques qui concernent les THs et TVs sont extraites du modèle de bâtiment, dans lequel elles sont des attributs accessibles ou calculables à partir des caractéristiques des classes Porte, Fenêtre, Ouverture, Ascenseur, Rampe et Escalier.

Au niveau Interne, l'approche de BiMov consiste à générer une zone tampon autour des obstacles, tel que les murs, les équipements et les machines. Les frontières de chaque obstacle sont décalées vers son extérieur de la distance D associée au navigant. Ce décalage permet d'obtenir des zones tampons à éviter autour des obstacles, qui seront considérées comme des zones non navigables. Ainsi, les nœuds de maillage aléatoire se trouvant à l'intérieur des zones tampons seront éliminés du graphe. La Figure 52 ci-dessous illustre l'évitement d'une zone tampon en 2D par un navigant au sol opérant un rayon de lacet. Le navigant qui est représenté par son centre de gravité ne sera pas en collision avec l'obstacle grâce à cette zone tampon. Si l'obstacle représente un équipement, une distance de sécurité (Ds) devra être ajoutée à la distance D ; cette distance de sécurité est représentée par une propriété de la classe Équipement. Il s'agit une fois encore de restreindre les zones de circulation de manière à créer des zones navigables en sécurité.

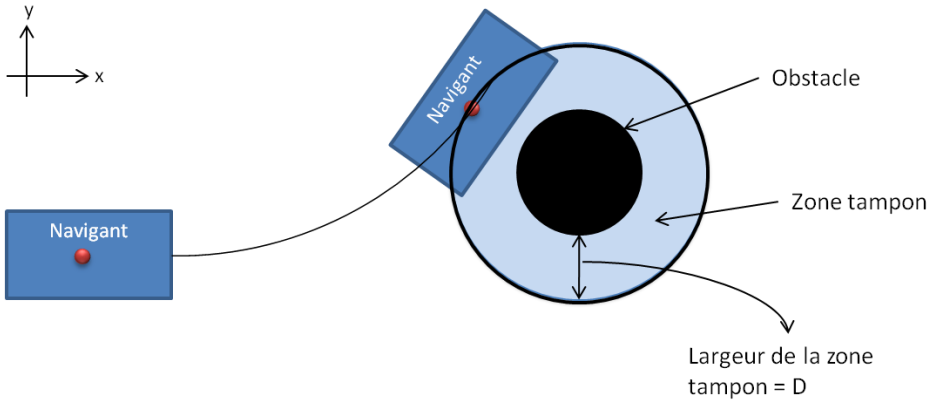


Figure 52 : Création de zone tampon autour des obstacles

3.6.2 Traitement sémantique

Il existe des caractéristiques non géométriques qui influencent les possibilités de déplacement d'un navigant à l'intérieur des espaces et transitions bâtiments. Ces caractéristiques ont été discutées dans la section décrivant le modèle du navigant, chargé de collecter les informations géométriques et non géométriques nécessaires en relation avec le déplacement du navigant. Le traitement sémantique consiste à prendre en considération toutes les caractéristiques non géométriques, qui ne sont donc plus seulement liées à son encombrement, mais à la nature même des éléments.

BiMov applique des ensembles de vérification liée aux aptitudes, aux limites physiques et aux habilitations des navigants. Il s'agit de vérifier si le navigant peut emprunter un escalier, si ce n'est pas le cas on utilise les ascenseurs ou les rampes pour circuler entre les étages. Concrètement, BiMov supprimera, dès le niveau du graphe Externe, tous les nœuds qui correspondent à une transition ou un espace intérieur non accessible par le navigant considéré. Si un navigant ne peut pas emprunter un escalier, BiMov éliminera tous les nœuds représentant un escalier. Si un navigant détient un niveau d'habilitation limité au strict minimum, tous les nœuds correspondant à des espaces réservés ou des transitions à accès restreint seront supprimés. Si la masse d'un (M) navigant excède la capacité d'emport d'un ascenseur, le nœud représentant cet ascenseur sera supprimé.

3.7 Prise en compte de l'état des espaces et transitions

Cette section vise à décrire les modalités de prise en compte de l'état des espaces et des transitions, susceptible de varier durant l'exploitation du bâtiment. L'état des espaces et des transitions, identifiées de manière cohérente avec leur référencement dans les graphes par leur nom et leur identifiant issus du modèle de bâtiment, sera maintenu à jour dans un modèle de calendrier externe par un ou plusieurs administrateurs. Le cadre général de prise en compte du calendrier est d'abord précisé dans une perspective de départ immédiat et de relative stabilité des informations prises en compte. Dans un second temps, la méthode de prise en compte de la dynamique des états de manière planifiée et/ou instable est développée.

3.7.1 Cadre général : départ immédiat et états stables

Pour le cas du graphe Macro, l'aspect dynamique de l'état des espaces et transitions n'est pas pris en compte, puisqu'il s'agit d'un graphe uniquement utile en phase de conception du projet de bâtiment et non durant son exploitation.

Dans le cas du graphe Externe, l'état de chaque nœud sera vérifié dans le calendrier. Chaque nœud du graphe Externe, qu'il corresponde à une transition ou un espace, s'il est déclaré indisponible dans le calendrier, sera considéré comme inaccessible. Les ensembles de vérifications correspondantes conduisent donc soit à préserver le graphe intact (si aucun nœud n'est réputé indisponible), ou à le réduire.

Le même principe est appliqué pour le graphe Interne, mais dans ce cas on rend inaccessible l'ensemble des nœuds internes qui correspondent à un espace ou une transition indisponible, ou tout simplement, on ne calcule pas le graphe Interne d'un espace dont le nœud est déclaré inaccessible dans le graphe Externe.

3.7.2 Cas particuliers de départ planifié en situation instable

Le moment du départ, la durée du trajet, l'instabilité des états peuvent remettre en cause une planification rudimentaire. Dans le cas général, le moment de la planification correspond à une situation de départ immédiat et se base sur l'hypothèse d'états stables durant tout le trajet, en supposant que ce trajet soit suffisamment rapide pour ne pas être perturbé. Mais dans ce cas, on ne prend pas en compte le changement de l'état des éléments qui peut survenir pendant le trajet du navigant, parce que le temps progresse et que certains éléments peuvent changer d'état. BiMov propose 3 options pour prendre en compte ces aspects (Figure 53) :

- **Option 1 « validité au départ » :** c'est l'option la plus simple, il s'agit de vérifier l'état des espaces et des transitions à l'instant de départ spécifié par le navigant, sans prendre en compte les changements d'états pendant le trajet. Dans ce cas, BiMov vérifie l'état à l'instant $T_{départ}$.
- **Option 2 « validité sur tout le trajet » :** cette option consiste à vérifier l'état des éléments sur toute la durée du trajet. La vérification doit donc se faire sur toute la plage de temps $[T_{départ}; T_{arrivé}e]$, qui dépend de la vitesse de déplacement du navigant. Il est donc nécessaire d'extraire la vitesse du navigant du modèle de navigant, de déterminer le moment de son arrivée à destination qui vaut : $T_{arrivée} = T_{départ} + \sum_0^n \Delta T$, ΔT étant la durée passée sur chaque arc du chemin et n représentant le nombre d'arcs du chemin. On propose de retenir le cas le plus défavorable : si un nœud est indisponible sur une partie de cette plage de temps, on considérera qu'il est indisponible pendant tout le déplacement. Il se peut toutefois que l'on écarte injustement un nœud, donc un itinéraire qui se serait avéré pertinent si l'on n'avait considéré que la plage de temps réduite pendant laquelle le nœud devait être disponible.
- **Option 3 « validité sur tout le trajet au moment du passage » :** c'est l'option la plus précise. Il s'agit cette fois de vérifier l'état (prévu) des espaces et des transitions au moment où le navigant est censé les emprunter et non plus sur l'ensemble du trajet. Dans ce cas BiMov vérifie l'état à l'instant T_i lorsque le navigant traverse l'arc i, donc $T_i = T_{i-1} + \Delta T_i$. Il ne s'agit pas du suivi en temps réel du navigant, mais d'une estimation de l'endroit où va se trouver le navigant, en fonction de l'instant du départ et de sa vitesse de déplacement sur chaque arc. La vitesse retenue est, pour chaque arc, la vitesse intrinsèque du navigant s'il se déplace en autonomie, ou la vitesse de son véhicule s'il est transporté (ascenseur, escalator).

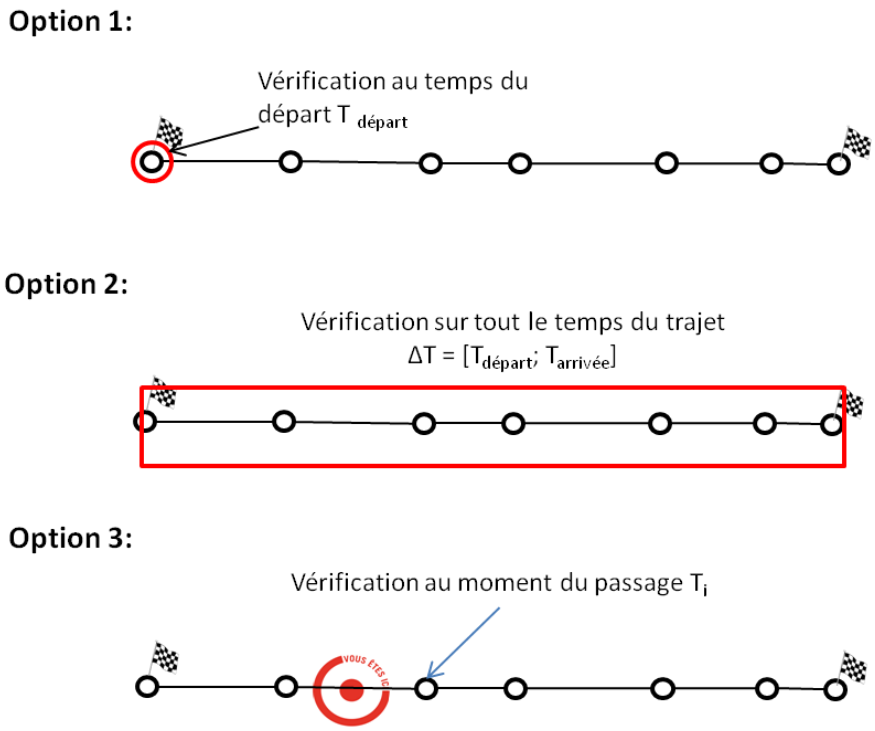


Figure 53 : Options plus ou moins précises de vérification de l'état d'accessibilité des nœuds

3.8 Génération de chemin

Les sections précédentes ont présenté les différents modèles de données utilisés dans BiMov, incluant un modèle de bâtiment ayant extrait les caractéristiques des constituants physiques bâtiments utiles pour la planification de chemin intérieur, un modèle de navigant destiné à caractériser les informations géométriques et non géométriques en relation avec le déplacement du navigant, un modèle de calendrier permettant de fournir les informations nécessaires sur les interventions planifiées à l'intérieur de bâtiments qui entravent la navigation intérieure, les différents modèles de graphes utilisés par BiMov (Macro, Externe, Interne) permettant d'expliciter de manière plus ou moins précise l'ensemble des itinéraires possibles pour un navigant, entre les espaces, via des transitions, mais aussi à l'intérieur des espaces et transitions. Les différents modèles de traitement permettant de construire les 3 graphes ont aussi été brièvement décrits.

La présente section aborde maintenant la question de trouver, pour un navigant donné (encombrement, aptitudes, habilitations), dans des circonstances données (accessibilité des espaces et des transitions), entre un point de départ et un point d'arrivée identifiés dans le modèle de bâtiment (de manière immédiate ou planifiée, en considérant des états stables ou variables), un chemin « **optimal** » entre ces deux points.

Comme souligné dans l'état de l'art du chapitre 2, il existe plusieurs algorithmes robustes de recherche de chemin optimal dans un graphe. Les plus connus sont Dijkstra et A*. L'algorithme de Dijkstra a été adopté pour déterminer le meilleur itinéraire dans les graphes Externe et Interne, dans la mesure où il s'avère à la fois simple et performant et parce qu'il est aussi le plus utilisé dans le domaine de routage.

Pour déterminer le chemin optimal, BiMov a besoin d'avoir identifié le navigant concerné, l'espace du départ et l'espace d'arrivée, le niveau de détail requis (Externe ou Interne), la date et l'heure du départ, l'option de calcul (prise en compte plus ou moins précis de la conjoncture liée aux états).

Concernant la recherche de chemin optimal dans le **graphe Externe**, l'application de l'algorithme est triviale puisque le graphe est déjà réduit. Seuls les nœuds accessibles, sûrs et disponibles au navigant sont référencés dans ce graphe. Donc, le processus de recherche de chemin se fait sur $G_{\text{Externe réduite}} = \{V_{\text{Externe-accessible-sûre-disponible}} ; E_{\text{Externe}}\}$ et $C : E \rightarrow \mathbb{R}$ une pondération des arcs. La fonction de coût C assigne à chaque arc une valeur numérique indiquant la longueur, le coût, le poids, la pénibilité associée à l'arc respectif, qui peuvent être la distance géométrique puisque l'on possède, grâce aux coordonnées des nœuds du graphe, toutes les informations géométriques nécessaires pour la calculer, le temps (ΔT) que mettra le navigant pour parcourir chaque arc, qui est aussi calculable, bien que plus difficile, puisqu'elle dépend de la vitesse du navigant en déplacement horizontal, du moyen utilisé pour franchir les transitions verticales donc de la vitesse intrinsèque du navigant ou des installations qu'il utilise pour se déplacer.

Le chemin optimal au niveau Externe peut être présenté textuellement, en indiquant la séquence d'espaces et de transitions à parcourir, ou bien graphiquement en traçant le chemin au sein de la maquette numérique du bâtiment.

Concernant la recherche de chemin optimal dans le **graphe Interne**, l'approche est plus complexe. Les nœuds référencés dans ce graphe sont également des nœuds réputés accessibles, sûrs, à l'écart des obstacles. En revanche, il est nécessaire de prendre en compte l'aptitude à la rotation du navigant. Un navigant ne devrait pas se voir proposer un cheminement « tordu » incompatible avec ses rayons de giration minimaux. Il s'agit d'un problème complexe, largement abordé dans le domaine de la robotique mobile afin d'optimiser la trajectoire des robots (Chang, 2009 ; Fu et al., 2018 ; Rufli et al., 2009). Bien que conscients de son importance, nous avons fait le choix de suggérer, dans le cadre de cette thèse dont ce n'est pas la problématique centrale, une approche simplifiée permettant néanmoins de prendre en compte cet aspect (Figure 54). Il est par exemple possible de créer des congés de raccordement circulaires permettant à un navigant, au niveau de chaque nœud du graphe Interne, d'effectuer une transition douce entre deux arcs consécutifs de ce graphe Interne (en

joignant par exemple l'abscisse curviligne 1-1/n de l'arc amont à l'abscisse curviligne 1/n de l'arc aval, avec n>=2). Si le rayon de l'arc calculé est supérieur ou égal au rayon de giration minimal du navigant, l'arc circulaire sera réputé praticable par ce navigant, ce qui signifie que le navigant pourra passer de l'arc amont à l'arc aval en empruntant le nœud commun (ou réciproquement). Il suffit d'affecter l'arc circulaire associé au nœud et au couple d'arcs d'un marqueur d'autorisation binaire (oui/non) de circulation, pour mémoriser le fait que ce couple d'arcs peut être emprunté par le navigant. Les couples d'arcs non autorisés seront naturellement exclus de la recherche de chemin le plus court.

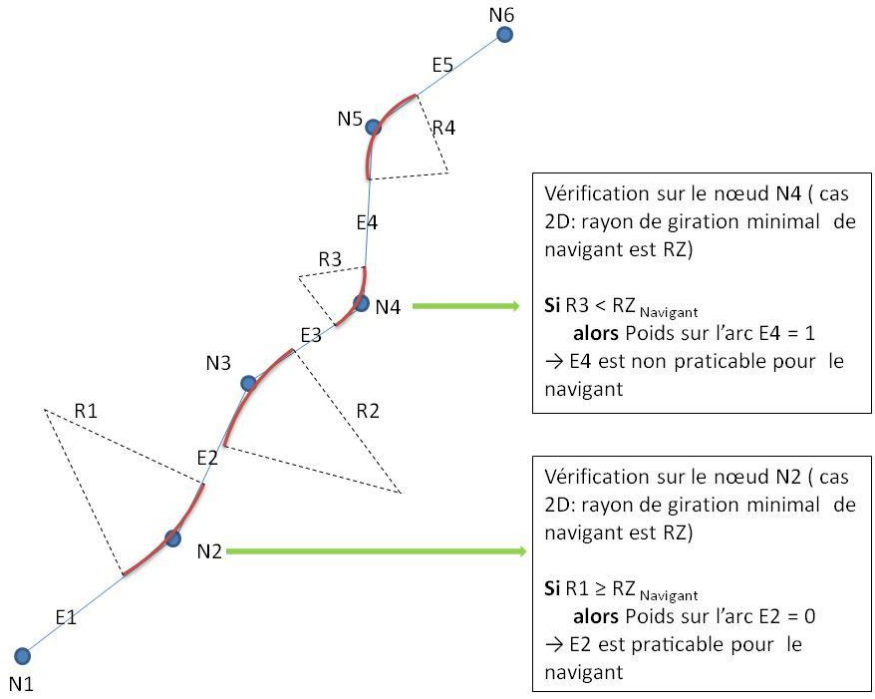
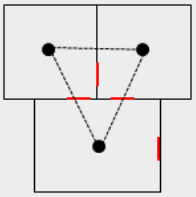
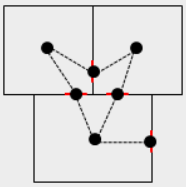
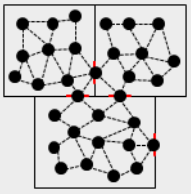


Figure 54 : Prise en compte de l'aptitude à la rotation du navigant

Le Tableau 5 ci-dessous résume l'ensemble des vérifications appliquées sur chaque graphe, ainsi que les aspects pris en compte dans chaque modèle de graphe.

Tableau 5 : Vue d'ensemble des vérifications du système BiMov

	Graphe Macro	**Graphe Externe**	**Graphe Interne**
Modèle de graphe	Nœud : espace Arc : liaison entre deux espaces lorsqu'une relation existe.  (3D)	Nœud : espace et transition V et H Arc : liaison entre espace et transitions associés.  (2D ou 3D)	Nœud : Maillage de nœuds aléatoire Arc : liaison entre nœuds voisins accessible.  (2D ou 3D)
Application	Vérification d'accessibilité	Accessibilité d'un navigant à tous les espaces	Chemin détaillé
Contenu de l'espace	Non considéré	Non considéré	Considéré
Navigant	Non considéré	Vérification géométrique et sémantique des transitions	Vérification géométrique et sémantique des transitions et obstacles intérieurs
Etat de l'espace/transition	Non considéré	Considéré	Considéré
Génération de chemin	Non considéré	Considéré	Considéré

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit l'approche originale proposée dans le cadre de cette thèse à des fins de planification automatique de chemin intérieur dans les bâtiments complexes. BiMov répond à plusieurs profils d'utilisateurs : il est à même d'aider les architectes à valider leur conception ; il permet aussi à différents visiteurs, en phase d'exploitation, d'obtenir une planification automatique de leur itinéraire le plus court à l'intérieur de bâtiments décrits par un BIM.

Le principe de BiMov est d'analyser un modèle de bâtiment décrit en IFC et de le transformer en graphe de navigation sur plusieurs niveaux de détail, puis de réduire les graphes en fonction du profil de navigant, du contenu des espaces, et enfin de l'état d'accessibilité conjoncturel des espaces et transitions du bâtiment.

BiMov s'appuie sur 4 modèles de données : (1) un modèle de bâtiment qui permet de représenter ses caractéristiques utiles pour la planification de chemin intérieur, en répertoriant les espaces, les transitions verticales et horizontales et les obstacles intérieurs, en représentant leurs caractéristiques géométriques et sémantiques nécessaires pour la planification de chemin ; (2) un modèle de navigant qui contient toutes les caractéristiques en relation avec le déplacement du navigant, telles que les caractéristiques géométriques, le niveau d'habilitation, l'aptitude et les limites de déplacement ; (3) un modèle de calendrier qui concentre les caractéristiques des événements perturbateurs pour d'éventuels déplacements intérieurs, immédiats ou planifiés ; (4) un modèle de graphe sur 3 niveaux de détails : un graphe Macro qui représente un modèle topologique du bâtiment, dédié aux architectes ; un graphe Externe, qui consiste à connecter les espaces intérieurs via leurs transitions verticales et horizontales, un graphe Interne décrivant, avec un niveau de précision ajusté, les pas de déplacements possibles à l'intérieur des espaces et transitions sans collision avec les obstacles tels que les meubles, les équipements et les machines. Ce modèle est conçu pour les navigants qui exigent un itinéraire détaillé fiabilisé pour se déplacer, comme les manutentionnaires d'objets encombrants, les robots mobiles (2D au sol) ou encore les drones (3D).

Le système proposé prend en considération le bâtiment, le profil des navigants et la dynamique de l'état des espaces et des transitions, ce qui en fait l'originalité. Un navigant dans BiMov est représenté par un point immatériel situé au centre de gravité de son volume englobant, et un rayon d'encombrement déterminé à partir de ses caractéristiques géométriques. Une approche géométrique et sémantique de vérification est appliquée pour considérer le profil de navigant. Au niveau Externe, seules les transitions verticales et horizontales sont vérifiées pour identifier les transitions franchissables par un navigant donné. Au niveau Interne, BiMov crée des zones tampons autour des obstacles (murs, frontière des portes, meubles et équipement). Tous les nœuds à l'intérieur des zones tampons sont éliminés, car réputés inaccessibles. L'approche utilisée dans BiMov est inspirée de la méthode Minkowski-Sum. En ce qui concerne l'aspect dynamique des espaces et transitions, BiMov récupère ces informations du modèle de calendrier et élimine automatiquement les nœuds qui correspondent à des espaces inaccessibles au moment du déplacement, avec 3 options de calcul, plus ou moins immédiates et précises.

La dernière étape de BiMov consiste à calculer le chemin optimal en se basant sur ces graphes réduits. L'algorithme de Dijkstra est appliqué sur les graphes Externe et

Interne, avec une pondération affectée aux arcs représentant un critère d'optimalité quelconque, par exemple la distance minimale.

Le chapitre suivant précise les technologies utilisées pour implémenter le système proposé ainsi que les développements réalisés sur cette base.

Chapitre 4 : Implémentation du système BiMov

4.1 Introduction
4.2 Environnement de développement
4.3 Exploitation du modèle IFC
4.3.1 Exemple d'un modèle IFC
4.3.2 Explicitation de la notion de voisinage entre espaces
4.3.2.1 Voisinage horizontal
4.3.2.1 Voisinage vertical

4.4 Développement de la plateforme gestionnaire
4.4.1 Gestion des modèles de navigants
4.4.2 Gestion des modèles de calendriers
4.5 Développement des algorithmes
4.5.1 Extraction des données du modèle IFC
4.5.2 Construction des graphes
4.5.3 Réduction des graphes
4.5.3.1 Réduction du graphe Externe
4.5.3.2 Réduction du graphe Interne
4.6 IHM dédiée à l'exploitation de BiMov par le navigant
4.7 Conclusion

4.1 Introduction

Le précédent chapitre a décrit les modèles de données et de traitements qui forment notre proposition de recherche.

Le présent chapitre a pour objectif de décrire un prototype destiné à illustrer la possibilité de mettre en œuvre concrètement cette proposition au moyen de technologies informatiques disponibles. Une première partie présente les briques logicielles et les langages de programmation qui ont été utilisés pour développer ce prototype. Une deuxième partie détaille le processus d'extraction du modèle BIM en format IFC et sa conversion en un modèle de bâtiment compatible avec les besoins de l'approche. Dans cette partie, la mise en œuvre des concepts et traitements permettant de rendre explicite la notion de voisinage entre les espaces intérieurs du modèle IFC est détaillée. Une troisième partie décrit la structure de données utilisée pour mettre en œuvre les modèles externes de navigant d'une part, de calendrier d'autre part, ainsi que les interfaces hommes-machines (IHM) développées pour que les gestionnaires de BiMov puissent éditer ces modèles externes. La mise en œuvre des principaux traitements est décrite, notamment le processus d'extraction des données géométriques et sémantiques du modèle IFC et la construction des différents graphes. Une dernière partie décrit les IHM de BiMov développées pour les utilisateurs désirant planifier un chemin intérieur. Une conclusion vient enfin clore ce chapitre.

4.2 Environnement de développement de BiMov

Afin de valider l'approche théorique décrite dans le troisième chapitre, un développement informatique a été entrepris, destiné à démontrer l'applicabilité des concepts, et pouvoir prouver qu'il est effectivement possible de trouver automatiquement un chemin interne optimal et circonstancié (selon le navigant, selon l'état des espaces et transitions), au sein d'un bâtiment décrit en format IFC, en suivant les propositions de recherche.

Comme discuté dans le chapitre 2, le modèle BIM en format IFC est un standard très utilisé pour le partage et l'échange de données de bâtiments. La modélisation d'un bâtiment au format IFC est une tâche longue et fastidieuse, prise en charge par des architectes et des bureaux d'études spécialisés, selon un processus coopératif souvent orchestré par un BIM manager. Elle requiert l'utilisation d'un ou plusieurs logiciels métiers (ArchiCAD, Revit, Allplan, Autocad Architecture, …). Cette tâche est considérée comme une tâche amont du processus BiMov. Nous faisons ainsi l'hypothèse que les modèles IFC de bâtiments sont « prêts à l'emploi ». Certains modèles IFC sont d'ailleurs disponibles sur Internet et peuvent être utilisés comme jeux de données tests pour BiMov (*http://openifcmodel.cs.auckland.ac.nz*). L'exploitation de ces modèles, pour expérimenter l'approche BiMov, nécessite de pouvoir lire et interpréter un fichier IFC, d'en extraire les entités pertinentes (espaces, murs, escaliers, portes…), d'exploiter leur sémantique (basée sur leur type) et leurs caractéristiques géométriques (enveloppe, position, coordonnées de points caractéristiques) et enfin de pouvoir les visualiser en 3D dans une fenêtre graphique.

Ces fonctionnalités sont toutes disponibles dans l'environnement de logiciel libre **IfcOpenShell** (*ifcopenshell.org*), qui intègre des bibliothèques permettant de lire un schéma IFC, de sélectionner des éléments du bâtiment selon leur type et de convertir leur géométrie dans l'environnement du modeleur géométrique 3D **OpenCascade** (*opencascade.com)*, et ainsi de bénéficier de toutes les fonctionnalités de raisonnement géométrique, de calcul algorithmique et de visualisation. L'ensemble est exploitable en **Python**, un puissant langage informatique qui peut être interprété ou compilé, de syntaxe simple et aérée, multiplateforme et orienté objet.

Les modèles de données externes de navigant et de calendrier ont été développés sous Microsoft Excel, en raison d'une part de la facilité de les éditer de façon totalement externe à BiMov, d'autre part de la possibilité de créer, lire et écrire des fichiers Excel à partir de Python, grâce aux modules XLRD, XLWT et WLUTILS. Les IHM dédiées aux gestionnaires et aux utilisateurs ont été développées avec **Tkinter** (Tk interface), un module intégré à la bibliothèque standard de Python. Figure 55 ci-dessous donne une vue d'ensemble des différents composants du prototype BiMov et indique les technologies logicielles utilisées pour les développer.

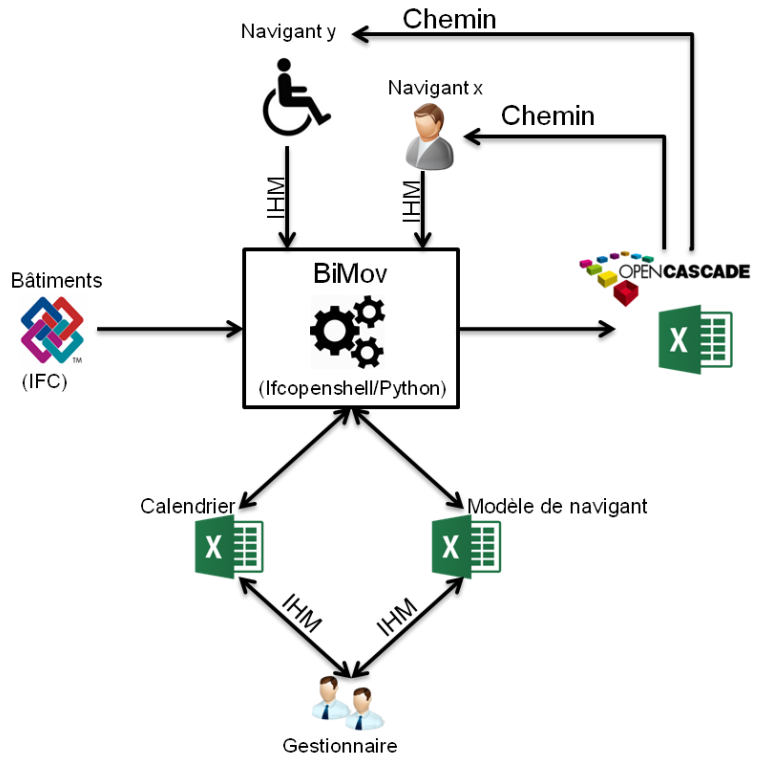


Figure 55 : Vue d'ensemble du prototype BiMov

4.3 Exploitation du modèle IFC

Les IFC forment un standard évolutif. Pour le développement du prototype, il est nécessaire de choisir une version d'IFC, afin de maîtriser les types d'informations susceptibles d'être extraits du fichier IFC. La version 2x3 d'IFC n'est pas la plus récente, mais c'est la plus répandue. Elle contient 653 entités et plus de 300 types de données supplémentaires, ainsi que des ensembles de propriétés (P-Set) extensibles. La Figure 56 ci-dessous représente l'ensemble des relations d'association (résultant d'une interprétation sémantique) entre les concepts du modèle de bâtiment de BiMov et les entités pertinentes du modèle IFC standard.

Les entités du modèle IFC utiles pour BiMov sont représentées sur fond bleu et comprennent : IfcBuilding, IfcBuildingStorey, IfcSpace, IfcDoor, IfcWindow, IfcStair, IfcTransportElement, IfcRamp, IfcWall, IfcColumn, IfcFurnishingElement, IfcDistributionElement, qui correspondent respectivement aux concepts de bâtiment, étage, espace, porte, fenêtre, ouverture, escalier, élément du transport (ascenseur et escalateur), rampe, mur, poteau, meubles (table, canapé, chaise…) et équipement.

L'entité IfcBuilding est associée à l'entité IfcBuildingStorey par la relation IfcRelAggregates, ce qui suggère qu'un bâtiment est un agrégat d'étages. Un IfcBuildingStorey est associé avec IfcSpace et les composants du bâtiment (IfcWall, IfcColumn, …) par la même relation.

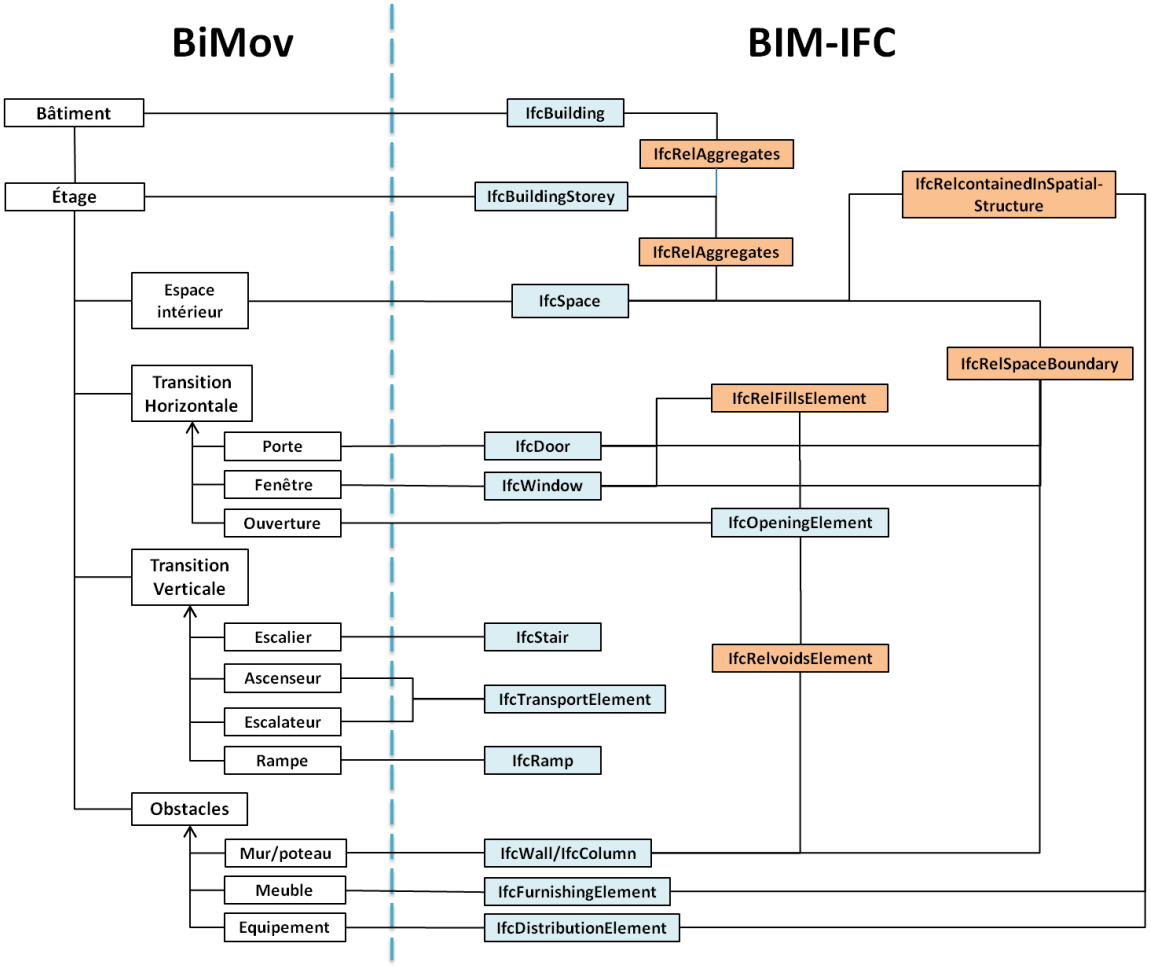


Figure 56 : Correspondances entre les classes de BiMov et les entités du modèle IFC

Le modèle IFC fournit des informations géométriques et sémantiques des composants des bâtiments, mais se révèle pauvre du point de vue de la topologie. La notion de voisinage entre les espaces intérieurs n'est pas explicite. Un traitement algorithmique basé sur les informations géométriques et sémantiques est nécessaire pour expliciter la notion de voisinage. Dans BiMov, les propriétés suivantes sont exploitées dans ce but.

Un IfcSpace est l'un des sous-types d'IfcSpatialStructureElement, qui est la généralisation de tous les éléments définissant une structure spatiale, comme IfcSite, IfcBuilding, IfcBuildingStorey. Les équipements et les meubles se réfèrent à un espace à l'aide de l'IfcRelContainedlInSpatialStructure. Les entités qui délimitent un IfcSpace, que ce soit un IfcWall, IfcDoor, IfcWindow ou IfcClomun, sont reliées à l'espace par la relation IfcRelSpaceBoundary.

En ce qui concerne les ouvertures dans les murs, IfcRelvoidElements permet de relier le mur avec IfcOpeningElement, et IfcRelFillsElement permet (éventuellement) de combler ces ouvertures avec un IfcDoor ou un IfcWindow.

Ces deux relations permettent de vérifier algorithmiquement d'une part si un mur fait partie de la frontière physique d'un espace et d'un autre espace, ce qui indique qu'il est une frontière commune à ces espaces, d'autre part qu'il présente une ouverture pouvant jouer le rôle de transition entre les deux espaces.

Les sections suivantes présentent un exemple de modèle IFC et détaillent l'ensemble des traitements utilisés pour expliciter la notion de voisinage entres les espaces intérieurs dans un modèle IFC.

4.3.1 Exemple de modèle IFC

Un modèle IFC peut être visualisé dans une application dédiée. Pour analyser plus facilement les modèles de bâtiments testés, le logiciel « BimVision » a été utilisé. Il permet de parcourir et visualiser un fichier IFC (*www.bimvision.com*). Un exemple est présenté dans la Figure 57 ci-dessous. À gauche de la figure, le modèle 3D est visualisé. A droite, la structure hiérarchique du modèle IFC est décodée.

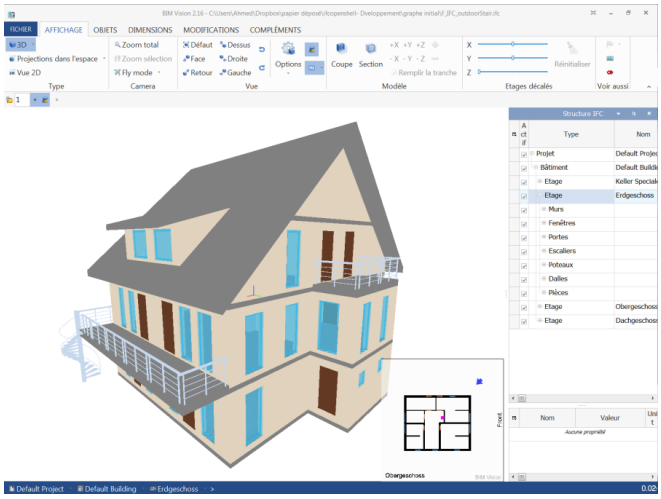


Figure 57 : Exemple de fichier IFC chargé dans BIMVision

Un Fichier IFC peut également être ouvert avec un éditeur de texte rudimentaire. Son interprétation par l'humain s'avère toutefois difficile en raison de la taille des fichiers, qui comptent généralement plusieurs centaines de milliers de lignes.

Un fichier IFC en format texte fait apparaître deux parties : « Header » et « Data ».

- L'en-tête « **Header** » contient des informations générales comme le nom du logiciel métier qui a produit le fichier, le nom du créateur et la référence à la version IFC utilisée (Figure 58),

```
HEADER;
FILE_DESCRIPTION(('ViewDefinition [CoordinationView]'),'2;1');
FILE_NAME('IfcOpenHouse.ifc','2014-06-30T17:09:43',(''),(''),'IfcOpenShell 0.5.0-dev','IfcOpenShell 0.5.0-dev','');
FILE_SCHEMA(('IFC2X3'));
ENDSEC;
```

Figure 58 : Exemple d'en-tête de ficher IFC

- La section « **Data** » contient les données IFC elles-mêmes. Chaque ligne de cette section représente une entité de modèle IFC, que ce soit un objet, une relation, une propriété ou juste une position 3D (Figure 59).

```
#92184= IFCSURFACESTYLE('Glass-klar',.BOTH.,(#92183));
#92186= IFCPRESENTATIONSTYLEASSIGNMENT((#92184));
#92188= IFCSTYLEDITEM(#92179,(#92186),$);
#92192= IFCSHAPEREPRESENTATION(#1739,'Body','Brep',(#92095,#92179));
#92198= IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE($,$,(#92192));
#92202= IFCDOOR('2Z5rQEQmXB5ugmHpWs6xAz',#21,$,$,$,#91880,#92198,'A28951CC-8608-4D30-A9-4D-ACA57FC12F0B',2590.,1290.);
#92221= IFCRELFILLSELEMENT('3u8p86Ngb1ix1eqpKg21mM',#21,$,$,#91851,#92202);
#92222= IFCDOORLININGPROPERTIES('0pxt3mWQ5DVgfhOQQOVyH1',#21,$,$,90.,50.,$,$,$,$,$,$,$,$);
#92226= IFCDOORPANELPROPERTIES('12rZqsN8PCDelAIZT1$UYp',#21,$,$,40.,.SWINGING.,1.,.MIDDLE.,$);
#92230= IFCDOORSTYLE('21YE4BVF9CeB5trWyMbKpb',#21,'IFC_SimpleDoor',$,$,(#92222,#92226),$,$,.SINGLE_SWING_LEFT.,.NOTDEFINED.,.T.,.F.);
#92237= IFCRELDEFINESBYTYPE('2uRPrldyr3swdJfaT3_MW3',#21,'IFC_SimpleDoor',$,(#92202),#92230);
#92239= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('ArchiCAD_GUID',$,IFCDESCRIPTIVEMEASURE('A28951CC-8608-4D30-A9-4D-ACA57FC12F0B'),$);
#92243= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('INFO',$,IFCDESCRIPTIVEMEASURE(''),$);
#92247= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('REVEAL',$,IFCINTEGER(0),$);
```

Figure 59 : Extrait de la section data d'un modèle IFC de maison

Chaque ligne dans la section Data commence par le numéro de ligne (#xxx), suivi d'un signe égal « = » ; cela permet de repérer cet élément dans un fichier IFC. Il vient ensuite le type de l'élément IFC suivi, entre parenthèses, de la liste des paramètres le définissant. On trouve en premier le GlobalId, identifiant unique de cet élément. Ensuite, on trouve l'historique de propriétaires (OwnerHistory), le nom (Name) de cet élément, la description (Description), le type de l'objet (ObjectType), sa position relative (ObjetPlacement) et la représentation géométrique de cet élément (Representation), ainsi que les listes d'éléments en relation avec lui. Le signe $ est utilisé lorsqu'un des paramètres n'est pas spécifié pour cet élément (Figure 60).

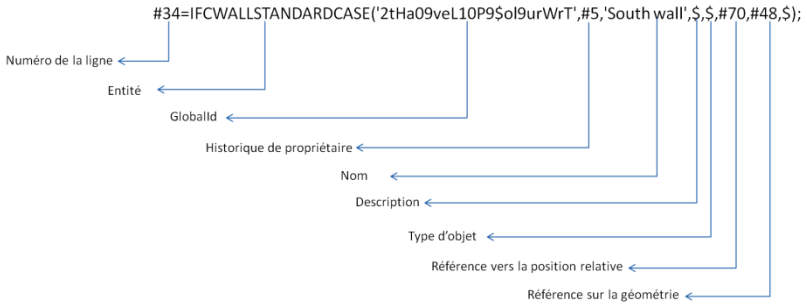


Figure 60 : Exemple de paramètres d'une entité IFC (un mur: IfcWallStandardCase)

4. 3.2 Explicitation de la notion de voisinage entre espaces

Comme expliqué dans le chapitre 3, le concept de voisinage immédiat est déduit d'une transition commune entre deux espaces. Le traitement pour le rendre explicite est différent selon qu'il s'agit d'une transition horizontale ou verticale.

4.3.2.1 Voisinage horizontal

Concernant le voisinage horizontal, pour chercher les transitions communes entre les espaces, BiMov exploite une relation du modèle IFC qui est IFCRelSpaceBoundary. Cette relation renseigne sur les frontières physiques et virtuelles des espaces. Les frontières physiques sont les éléments construits dans le bâtiment comme les murs,

les portes, les fenêtres... Les frontières virtuelles sont les éléments non construits (c'est le cas d'un espace ouvert où plusieurs espaces sont considérés comme un seul).

Pour le cas d'une porte, grâce à cette relation, on peut parcourir l'ensemble des portes du modèle et identifier, pour chacune d'elles, les deux frontières physiques dont elle fait partie, donc les deux espaces auxquels elle se réfère simultanément. On peut en déduire que ces espaces sont voisins et que la porte constitue une transition physique entre eux. Les attributs des relations comme le **RelatingSpace,** peuvent être utilisés pour identifier l'espace auquel se réfère l'élément frontière; **RelatedBuildingElement** permet d'identifier l'élément qui délimite l'espace, que ce soit un IfcWall, un IfcDoor ou un IfcWindow ; **PhysicalOrVirtualBoundary** permet d'identifier les éléments physiques ou virtuels; **InternalOrExternalBoundary** permet d'identifier les frontières exposées à l'extérieur ou à l'intérieur. Ainsi, pour une porte intérieure il faut que la frontière soit physique de type « IfcDoor » et « Internal ». Pour une porte d'entrée, porte-fenêtre ou porte de secours, il faut que la frontière soit physique, de type « IfcDoor » et « External ». De même, dans le cas d'une fenêtre donnant sur l'extérieur, la frontière est physique de type « IfcWindow » et « External » (Figure 61).

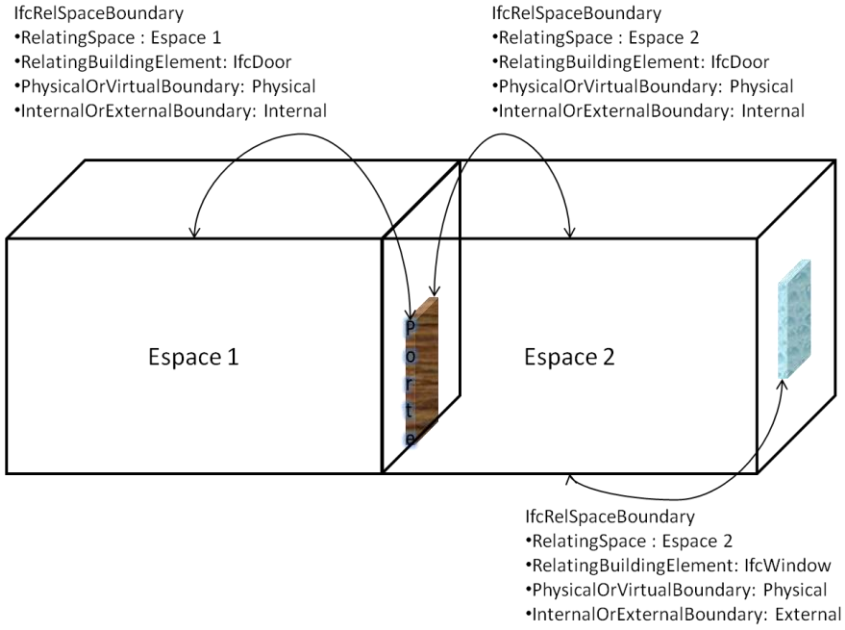


Figure 61 : Cas d'une porte et d'une fenêtre

Pour le cas d'une ouverture, on cherche les murs communs entre les espaces qui font aussi partie de la frontière physique de l'espace. Un mur commun entre deux espaces ne signifie pas que les deux espaces sont connectés, sauf s'il contient une ouverture. BiMov exploite les relations **IfcRelvoidElements** pour vérifier si un mur contient des ouvertures et la relation **IfcRelFillsElement** pour vérifier si cette ouverture est

vide ou bien comblée par une porte ou une fenêtre (Figure 62). Pour extraire ces éléments, BiMov parcourt en premier les relations **IfcRelvoidElements**, puis extrait les murs qui contiennent des ouvertures avec l'attribut **RelatingBuildingElements** et les ouvertures elles-mêmes avec l'attribut **RelatedOpeningElement**. Ensuite, BiMov parcourt **IfcRelFillsElement,** puis extrait les ouvertures en utilisant l'attribut **RelationOpeningElement** et la porte ou la fenêtre qui ferme chaque ouverture, si elle existe, avec **RelatedBuildingElement.**

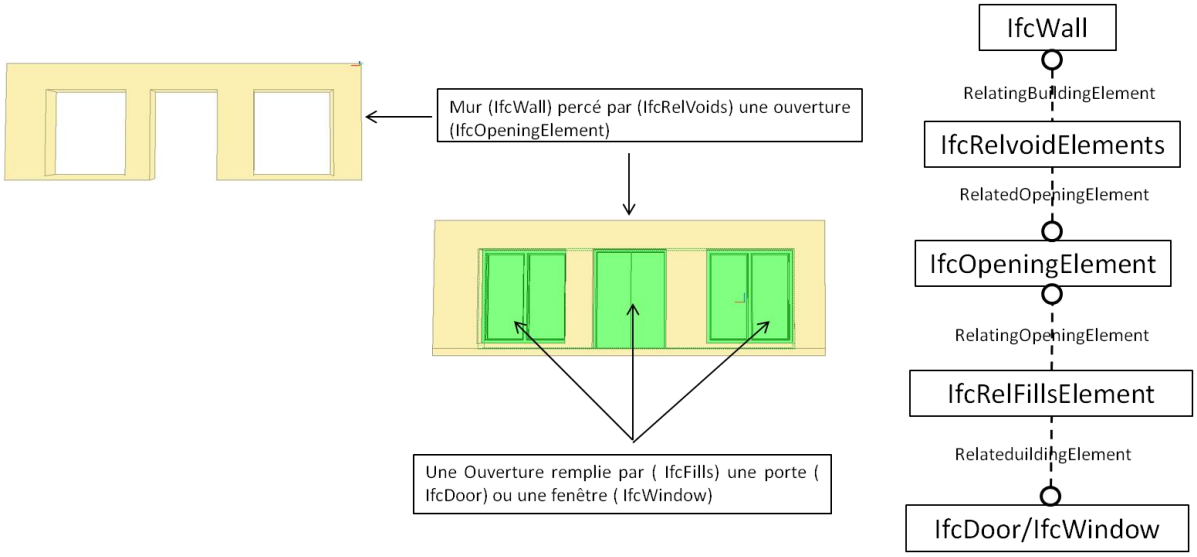


Figure 62 : Cas d'une ouverture

4.3.2.2 Voisinage vertical

Dans le format IFC, il n'y a pas de relation explicite entre les espaces et les transitions verticales qui permettraient, par exemple, de savoir qu'un escalier dessert un espace.

BiMov a recours à un ensemble de traitements géométriques et sémantiques pour mettre en correspondance les TVs et les espaces desservis par ces TVs.

Sachant qu'un escalier commence au niveau d'une dalle et finit au niveau d'une dalle (sémantique véhiculée par le concept d'escalier), BiMov compare la position géométrique de l'escalier à celle des dalles présentes dans le modèle IFC (IfcSlab). Sachant ensuite que les dalles appartiennent à la frontière de leur espace, la relation entre escalier et espaces desservis peut être révélée algorithmiquement. BiMov considère d'une part les coordonnées X, Y et Z maximales et minimales de chaque dalle, d'autre part les coordonnées Xg, Yg et Zg du centre de gravité du modèle géométrique de chaque escalier (IfsStair ou IfcStairFlight). Une fois les dalles identifiées, le raisonnement sémantique lié au concept de dalle est exploité pour identifier les es-

paces auxquels appartiennent les dalles, en se basant sur la relation IfcRelSpace-Boundary et en utilisant l'attribut **RelatedBuildingElement**.

Un traitement similaire est applicable au cas d'un escalator, sauf qu'il ne s'agit pas d'une connexion géométrique entre l'entité IfcStair/IfcStairFlight et IfcSlab, mais d'une connexion entre un IfcTransportElement de type Escalator et un IfcSlab, car un escalator est une installation représentée par IfcTransportElement en IFC.

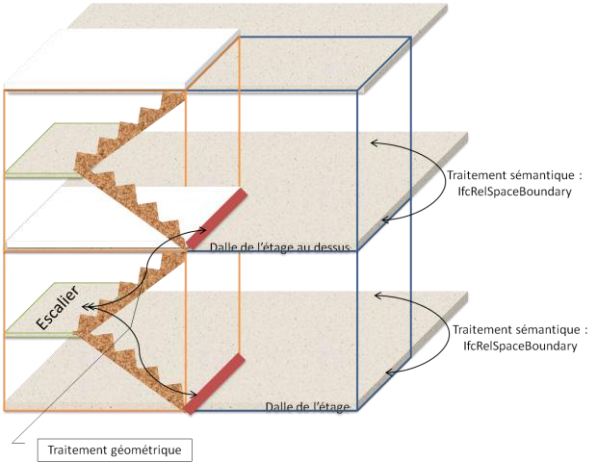


Figure 63 : Cas d'un escalier

En ce qui concerne les ascenseurs (Figure 64), ils sont généralement représentés en un seul bloc desservant deux ou plusieurs niveaux. Contrairement aux escaliers, les ascenseurs contiennent des portes qui permettent aux navigants d'y accéder. Pour cela, BiMov utilise un raisonnement géométrique et sémantique pour trouver les liaisons entre l'ascenseur et l'espace qui est précisément desservi au niveau de chaque étage. Le raisonnement géométrique permet d'identifier la porte de l'ascenseur. S'il existe une connexion géométrique entre l'ascenseur et une porte, alors cette porte dessert l'ascenseur. Ensuite, BiMov poursuit le raisonnement sémantique pour identifier à quelle frontière d'espace appartient la porte de l'ascenseur, en utilisant la relation IfcRelSpaceBoudanry, pour finalement identifier l'espace desservi.

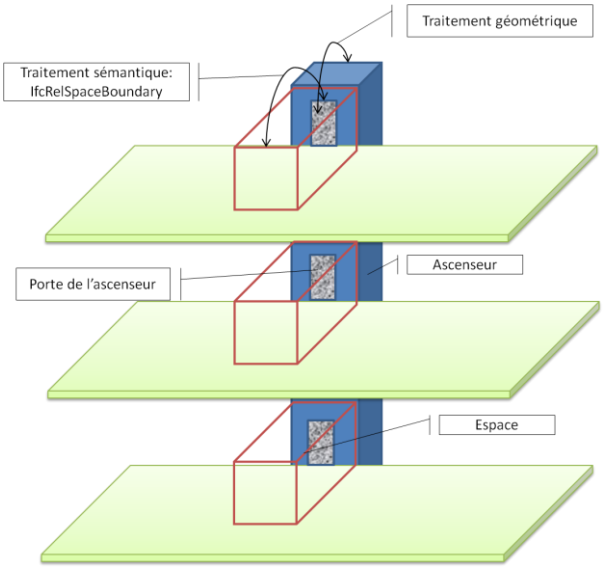


Figure 64 : Cas d'un ascenseur

Concernant les rampes, BiMov utilise un raisonnement géométrique pour identifier les deux dalles connectées par la rampe. Ensuite, un raisonnement sémantique pour identifier les espaces qui appartiennent à ces dalles en utilisant la relation IfcRelSpaceBoudary (Figure 65). Le traitement est similaire au cas de l'escalier.

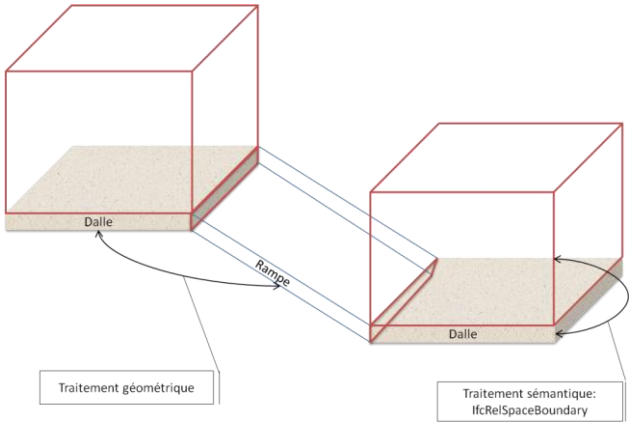


Figure 65: Cas d'une rampe

Dans le processus d'extraction et d'analyse des éléments voisins, BiMov se base sur le **GlobalID** affecté à chaque entité IFC. L'ensemble de ces raisonnements conduit à créer une liste d'éléments voisins, dans laquelle chaque relation de voisinage est exprimée sous la forme :

Espace <--> Transition (porte, ouverture, escalier, ascenseur, rampe) <--> Espace.

4.4 Développement de la plateforme des gestionnaires

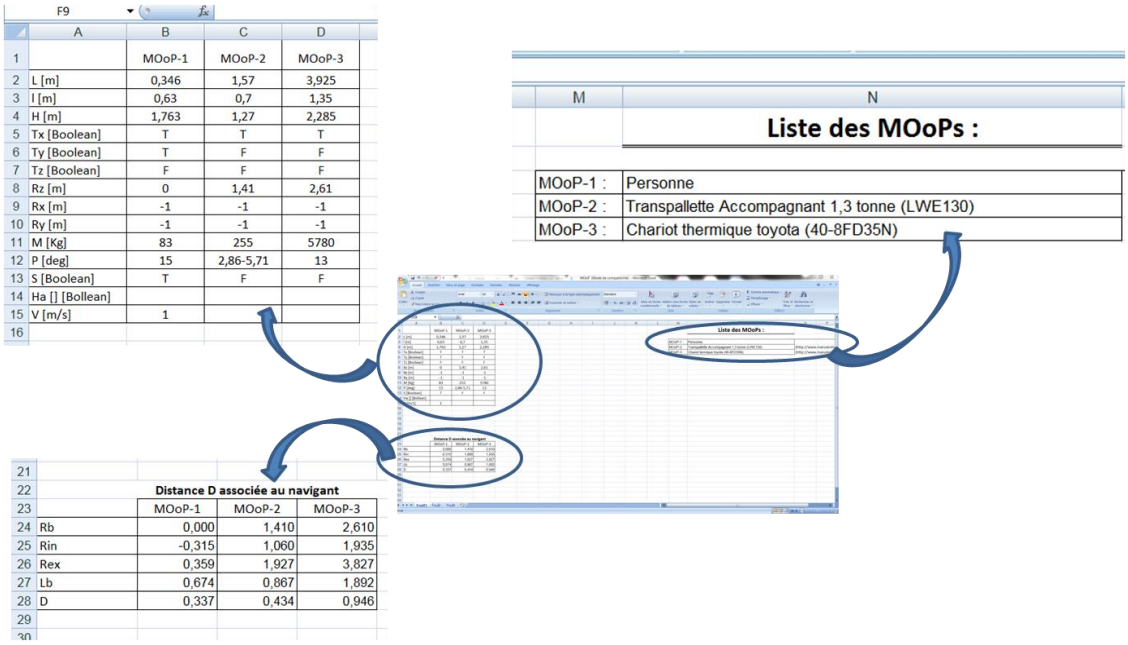
Cette section détaille le développement de la plateforme gestionnaire, qui permet de mettre en œuvre le modèle de données des navigants d'une part, le modèle de calendrier de l'état des espaces et des transitions du bâtiment d'autre part. La plateforme est destinée à être exploitée par un ou plusieurs gestionnaires au moyen des IHM présentées. Pour des raisons de simplification, l'exploitant générique de cette plateforme sera désigné par « le gestionnaire » dans la suite.

La page d'accueil de la plateforme gestionnaire est présentée dans la Figure 66. À partir de cette page, le gestionnaire peut se diriger vers une page permettant de gérer les navigants ou bien vers une page permettant de gérer le calendrier.

Figure 66 : Page d'accueil de la plateforme gestionnaire

4.4.1 Gestion des modèles de navigants

Le modèle de navigant a été développé sous Excel. Les caractéristiques d'un navigant sont ainsi enregistrées dans un simple tableau. Une illustration est donnée (Figure 67). A gauche, en haut de la figure, chaque colonne correspond à un navigant ou MOoP (Mobile Object or Person). Le tableau en haut à droite de la figure représente la liste des navigants enregistrés. Le tableau en bas à gauche de la figure représente la distance D (rayon d'encombrement) associée à chaque navigant.



	A	B	C	D
1		MOoP-1	MOoP-2	MOoP-3
2	L [m]	0,346	1,57	3,925
3	l [m]	0,63	0,7	1,35
4	H [m]	1,763	1,27	2,285
5	Tx [Boolean]	T	T	T
6	Ty [Boolean]	T	F	F
7	Tz [Boolean]	F	F	F
8	Rz [m]	0	1,41	2,61
9	Rx [m]	-1	-1	-1
10	Ry [m]	-1	-1	-1
11	M [Kg]	83	255	5780
12	P [deg]	15	2,86-5,71	13
13	S [Boolean]	T	F	F
14	Ha [] [Bollean]			
15	V [m/s]	1		
16				

M	N
	Liste des MOoPs :
MOoP-1 :	Personne
MOoP-2 :	Transpallette Accompagnant 1,3 tonne (LWE130)
MOoP-3 :	Chariot thermique toyota (40-8FD35N)

21				
22	**Distance D associée au navigant**			
23		MOoP-1	MOoP-2	MOoP-3
24	Rb	0,000	1,410	2,610
25	Rin	-0,315	1,060	1,935
26	Rex	0,359	1,927	3,827
27	Lb	0,674	0,867	1,892
28	D	0,337	0,434	0,946
29				

Figure 67 : Structure de données de quelques navigants sous Excel

La création d'un navigant est assurée par une IHM dédiée. Le gestionnaire peut ajouter, modifier ou supprimer un navigant. Les modifications validées par les gestionnaires mettent automatiquement à jour le modèle de données du navigant.

Les modalités de gestion des navigants sont illustrées dans la Figure 68. Cette IHM contient 3 rubriques qui correspondent aux 3 scénarios que le gestionnaire peut réaliser. Le gestionnaire peut d'abord choisir le fichier pour enregistrer les données des navigants à partir d'une liste déroulante, chaque fichier peut contenir un ou plusieurs navigants. Une fois le fichier choisi, le gestionnaire peut réaliser l'un des trois scénarios :

- Scénario 1 «ajouter un navigant» : il faut saisir les caractéristiques du nouveau navigant dans chaque cellule en respectant les unités, ensuite spécifier le rayon d'encombrement associé au navigant (**calculer la distance D associée au navigant**) et enfin **valider/enregistrer** pour mettre à jour ses informations dans le fichier sélectionné au début.
- Scénario 2 «Modifier un navigant» : il faut d'abord choisir le navigant qu'on souhaite modifier à partir d'une liste déroulante présentant les navigants référencés dans le fichier sélectionné et **Choisir/mettre à jour**. Le gestionnaire peut visualiser ses caractéristiques. Chaque propriété du navigant sélectionné peut-être éditée à partir d'une liste déroulante. Le bouton **valider/enregistrer** permet de mettre à jour les modifications.

- Scénario 3 «Supprimer un navigant» : il faut d'abord choisir le navigant qu'on souhaite supprimer à partir d'une liste déroulante, ensuite cliquer sur le bouton **Supprimer** pour le supprimer du fichier ou du modèle de navigant.

L'ensemble de déroulement de chaque scénario est illustré dans l'organigramme ci-dessous (Figure 69).

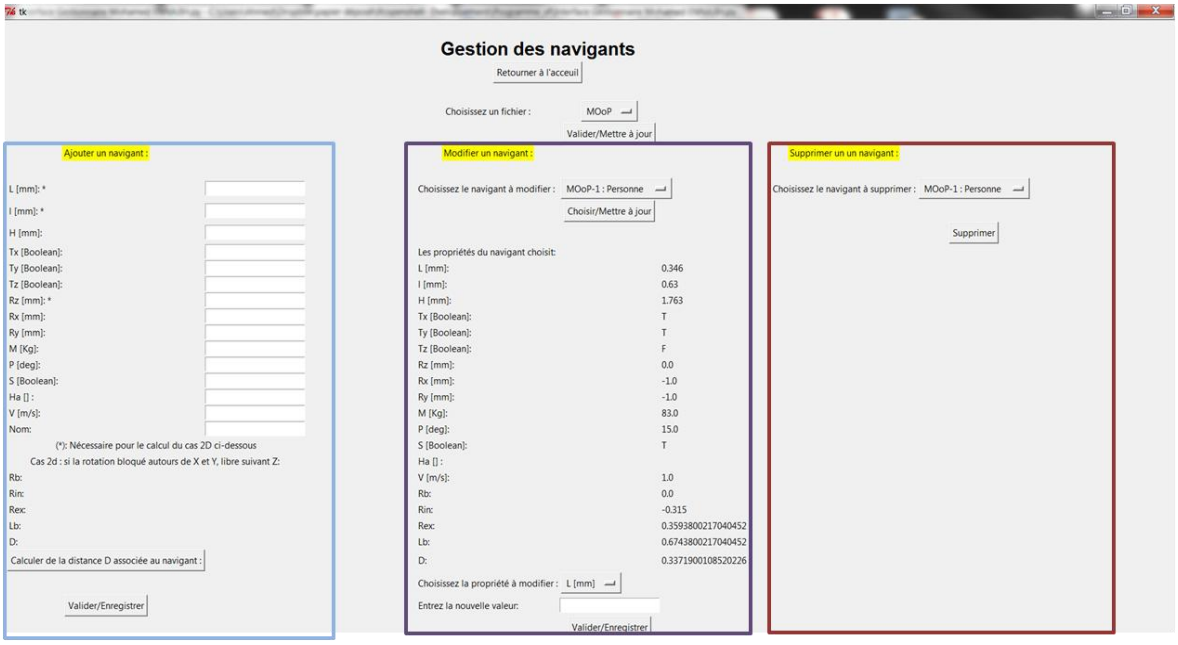


Figure 68 : Fenêtre IHM de gestion des navigants

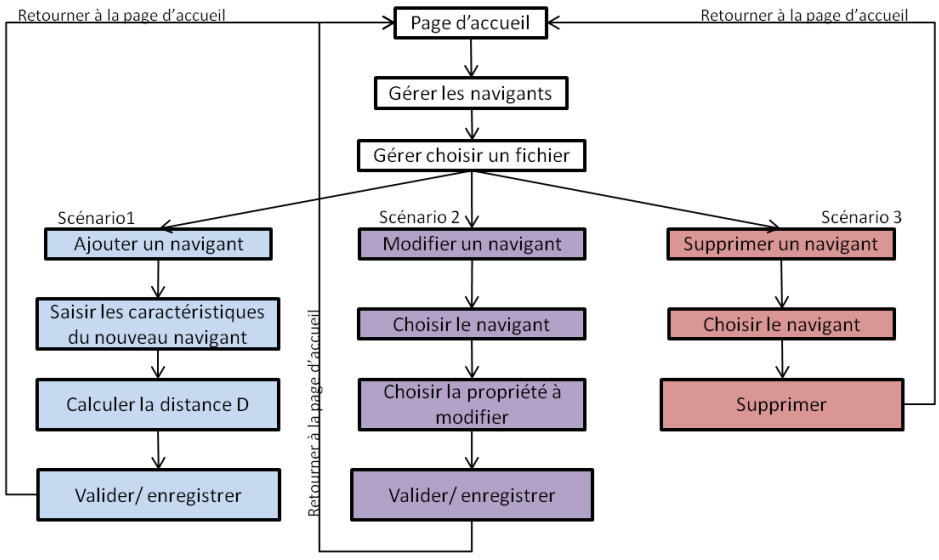


Figure 69 : Déroulement des différents scénarios

4.4.2 Gestion des modèles de calendriers

Le calendrier des événements associé à un bâtiment a également été développé sous Excel. Pour générer un nouveau calendrier ex-nihilo, une macro Excel a été écrite. La principale caractéristique à fournir est le pas de temps selon lequel sera créé le calendrier. L'exécution de cette macro permet d'obtenir un calendrier «vierge» prêt à être chargé dans l'environnement «Gestion du calendrier» réservé aux gestionnaires (Figure 70). Ce calendrier vierge contient deux colonnes (A et B) qui sont prévues pour identifier les constituants du bâtiment au moyen du GlobalId (colonne A) et du Nom plus explicite, de l'espace ou de la transition (colonne B). Lorsque le gestionnaire choisit de commencer à gérer un bâtiment, le fichier IFC correspondant est lu et ces deux colonnes se complètent automatiquement. Chaque bâtiment géré par le gestionnaire aura donc son propre modèle de calendrier.

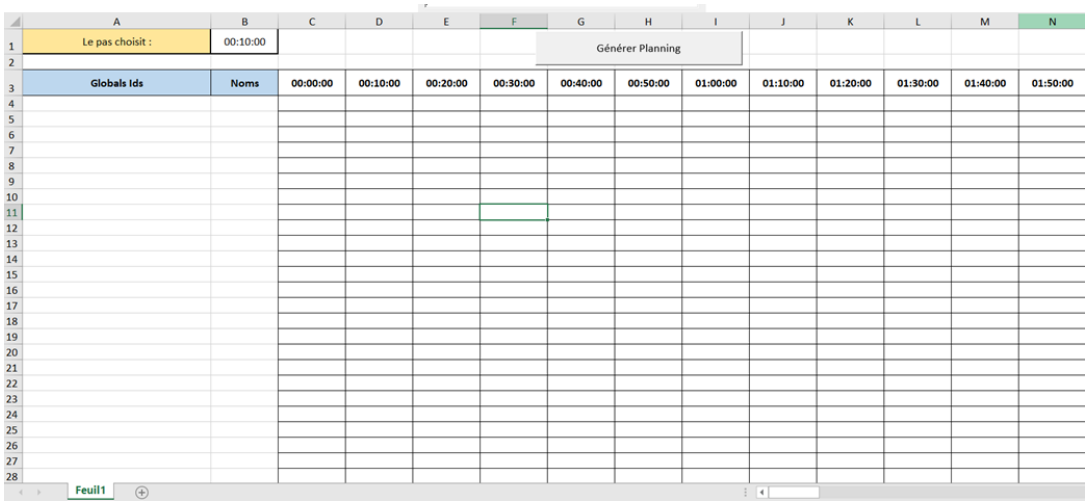


Figure 70 : Création d'un calendrier vierge

Une fois le calendrier créé (ce qui n'arrive qu'une fois), le gestionnaire pourra ajouter, modifier ou supprimer des événements. Les modalités de «Gestion du calendrier» sont illustrées dans la Figure 71.

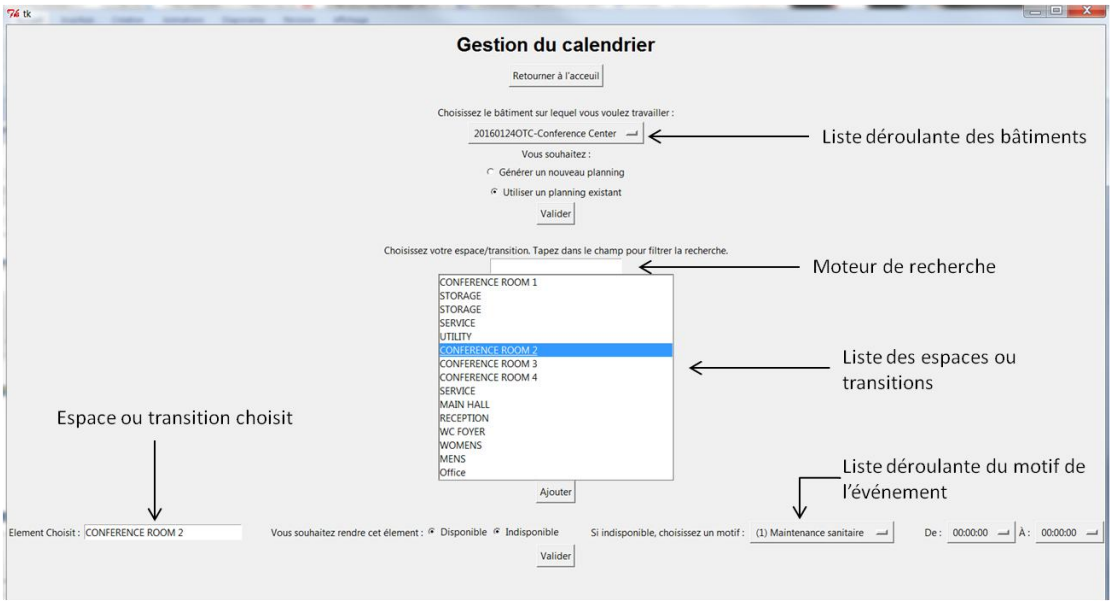
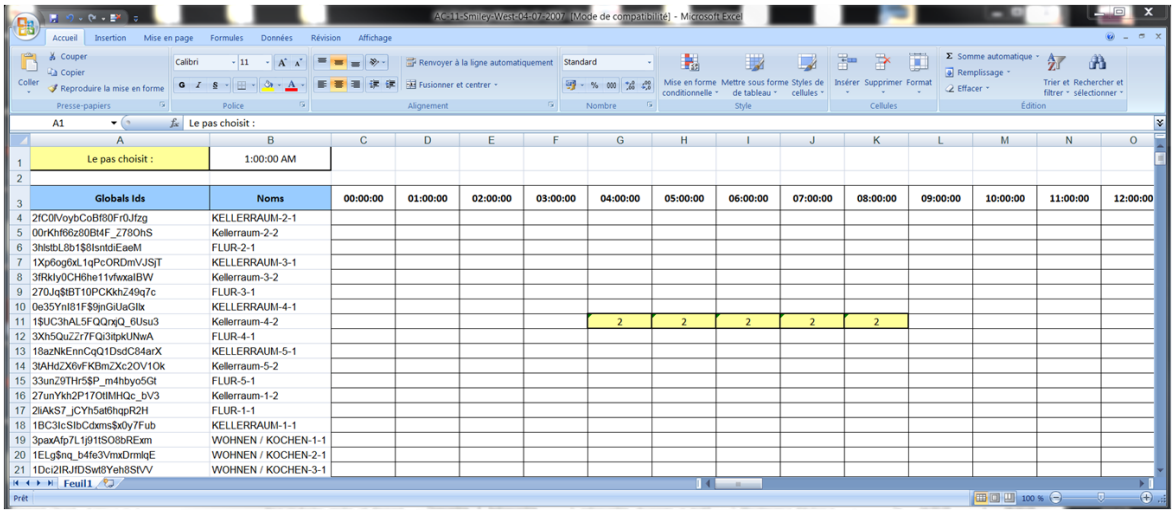


Figure 71 : Modalités de gestion du calendrier d'un bâtiment

Le gestionnaire doit d'abord choisir le bâtiment à partir d'une liste déroulante. Ensuite, il peut choisir soit de **générer un nouveau calendrier**, soit d'**utiliser un calendrier existant**.

Pour rendre disponible ou indisponible un espace ou une transition, le gestionnaire commence par rechercher l'élément concerné à l'aide d'un moteur de recherche. Ensuite, il peut spécifier le motif de l'événement. Quelques motifs récurrents ont été saisis en tant que jeu de données, dont la liste est extensible: (1) maintenance sanitaire; (2) maintenance électrique; (3) maintenance équipement; (4) horaire d'ouverture et fermeture; (5) cas d'urgence. Le gestionnaire saisit ensuite les moments de début et de fin de l'événement. Le bouton **valider** permet de mettre à jour le calendrier. La figure ci-dessous (Figure 72) montre le résultat de la saisie d'un événement de motif 2, («travaux de maintenance électrique») entre 4 h et 8 h, dans l'espace « Kellerraum-4-2».



Le pas choisit :	1:00:00 AM

Globals Ids	Noms	00:00:00	01:00:00	02:00:00	03:00:00	04:00:00	05:00:00	06:00:00	07:00:00	08:00:00	09:00:00	10:00:00	11:00:00	12:00:00
2fC0lVoybCoBf80Fr0Jfzg	KELLERRAUM-2-1													
00rKhf66z80Bt4F_Z78OhS	Kellerraum-2-2													
3hlstbL8b1$8lsntdiEaeM	FLUR-2-1													
1Xp6og6xL1qPcORDmVJSjT	KELLERRAUM-3-1													
3fRkly0CH6he11vfwxalBW	Kellerraum-3-2													
270Jq$tBT10PCKkhZ49q7c	FLUR-3-1													
0e35YnI81F$9jnGiUaGIlx	KELLERRAUM-4-1													
1$UC3hAL5FQQnxjQ_6Usu3	Kellerraum-4-2					2	2	2	2	2				
3Xh5QuZZr7FQi3itpkUNwA	FLUR-4-1													
18azNkEnnCqQ1DsdC84arX	KELLERRAUM-5-1													
3tAHdZX6vFKBmZXc2OV1Ok	Kellerraum-5-2													
33unZ9THr5$P_m4hbyo5Gt	FLUR-5-1													
27unYkh2P17OtlMHQc_bV3	Kellerraum-1-2													
2lkAkS7_jCYh5at6hqpR2H	FLUR-1-1													
1BC3IcSIbCdxms$x0y7Fub	KELLERRAUM-1-1													
3paxAfp7L1j01tSO8bRExm	WOHNEN / KOCHEN-1-1													
1ELg$nq_b4fe3VmxDrmlqE	WOHNEN / KOCHEN-2-1													
1Dci2IRJfDSwt8Yeh8StVV	WOHNEN / KOCHEN-3-1													

Figure 72 : Création d'un événement de calendrier

4.5 Développement des algorithmes

Cette section détaille les algorithmes développés pour extraire et analyser les données IFC, exploiter les données du modèle de navigant et du modèle de calendrier, construire le graphe à plusieurs niveaux et ensuite réduire les graphes en fonction des navigants et des évènements de calendrier.

4.5.1 Extraction des données du modèle IFC

La première action de BiMov consiste à initialiser la fenêtre d'affichage graphique d'OpenCsacade avec **ifcopenshell.utils.initialize_display()** et à sélectionner le fichier IFC du bâtiment considéré. La fonction **ifcopenshell.open("fichier_IFC.ifc")** permet de lancer la lecture du fichier. Les entités pertinentes du modèle IFC sont isolées au moyen de la fonction **Ifc_file.by_type ("xxxx")** ; par exemple, pour extraire la liste d'espaces, on utilise **Ifc_file.by_type ("IfcSpace")**.

Le programme en pseudocode ci-dessous montre l'algorithme qui permet de révéler les espaces voisins horizontalement via une porte. Il s'agit d'extraire une liste d'IfcRelSpaceBoundary du modèle IFC, ensuite de raffiner la liste par l'extraction des frontières 'PHYSYCAL' de type IfcDoor. Puis, d'extraire les espaces relatifs (RelatingSpace) de deux RelSpacesBoundary lorsqu'ils partagent le même IfcDoor (relatedBuildingElment) en se référant à leur GoballId. Le parcours de toute la liste IfcRelSpaceBoundary résulte en une liste de voisinages horizontaux via des portes.

Algorithme 1: extraire le voisinage horizontal

```
1:  List A= Ifc_file.by_type ("IfcRelSpaceBoudary")
2:  List B= Ifc_file.by_type ("IfcDoor")
3:  List C and D= []
4:  For X in A
5:      A[X].PhysicalOrVirtuel=='PHYSICAL'
6:      Get the list of physical Boundary C
7: End For
8:  For X in C
9:      For Y in B
10:         if C [X].RelatedBuidingElement.GlobalId==B[Y].GlobalId
11:         Get the list of boundary by Door D
12: End For
13: End For
14: For X in D
15: if D[X]. RelatedBuidingElement.GlobalId== D[X+1]. RelatedBuidingElement.GlobalId
16:     Get the list of neighboring spaces (D[X].relatingSpace; D[X].RelatedBuildinElement; D[X+1].relatingSpace)
17: End For
```

L'algorithme qui permet de révéler les espaces voisins horizontalement par une simple ouverture dans un mur (sans porte) est plus simple.

Algorithme* 2: *extraire les murs qui contiennent des ouvertures (Ouverture ; mur ; élément)

```
1:  List A= Ifc_file.by_type ("IfcRelVoidsElement")
2:  List B= Ifc_file.by_type ("IfcRelFillsElement")
3:  For X in A
4:      For Y in B
5:          if A[X].RelatedOpeningElement.GlobalId==B[Y].RelatingOpeningElement.GlobalId:
6:              Get the list of Opening-Wall-Element (A[X].RelatedOpeningElement; A[X].RelatingBuildingElement; B[Y].RelatedBuildingElement)
7:      End For
8: End For
```

Dans la plupart des traitements géométriques, BiMov se base sur le volume englobant de l'objet considéré, que ce soit un espace, un escalier, un ascenseur, de manière à accélérer les traitements. Pour obtenir le volume englobant d'un objet on utilise **OCC.utils.get_Boundingbox(),** une fonction de OCC. Pour extraire le centre de gravité de ce volume englobant, on utilise **OCC.Utils.Common.center_boundingbox ()**.

Les algorithmes en pseudocode 3, 4 et 5 ci-dessous montrent comment révéler les espaces voisins verticalement, via un escalier, une rampe ou un ascenseur.

Algorithme* 3: *Voisinage vertical (cas d'escaliers)

```
List A= Ifc_file.by_type ("IfcRelSapceBoudary")
List B= Ifc_file.by_type ("IfcStair")
List C= Ifc_file.by_type ("IfcSlab")
For I in B
    Get the bounding box of Stair OCC.utils.get_Boundingbox (Shape B [I])
        For J in C
            Get the bounding box of Slab OCC.utils.get_Boundingbox (Shape C [J])
                If Bbox.B[i] ∩ Bbox.C[J] ≠ 0
                D = Get the list of Slab-Stair
        End For
End For
For I in A
    For J in D
        If A[I].RelatedBuildingElement.GlobalID ==D[J].Slab.GolabId
        Get the list of Stair-Space (A[I].RelatingSapce; D[J].Stair)
    End For
End For
```

Algorithme* 4: *Voisinage vertical (cas des rampes)

```
List A= Ifc_file.by_type ("IfcRelSapceBoudary")
List B= Ifc_file.by_type ("IfcRamp")
List C= Ifc_file.by_type ("IfcSlab")
For I in B
    Get the bounding box of Ramp OCC.utils.get_Boundingbox (Shape B [I])
        For J in C
            Get the bounding box of Slab OCC.utils.get_Boundingbox (Shape C [J])
                If Bbox.B[i] ∩ Bbox.C[J] ≠ 0
                D = Get the list of Slab-Ramp
    End For
End For
For I in A
For J in D
        If A[I].RelatedBuildingElement.GlobalID ==D[J].Slab.GolabId
        Get the list of Ramp-Space (A[I].RelatingSapce; D[J].Ramp)
End For
End For
```

Algorithme* 5: *Voisinage vertical (cas des ascenseurs)

```
1:  List A= Ifc_file.by_type ("IfcRelSapceBoudary")
2:  List B= Ifc_file.by_type ("IfcTransportElement")
3:  List C= Ifc_file.by_type ("IfcDoor")
4:  For I in B
5:      Get the bounding box of Transport Element type elevator OCC.utils.get_Boundingbox (Shape B
[I].OperationType .ELEVATOR)
6:          For J in C
7:              Get the bounding box of Door OCC.utils.get_Boundingbox (Shape C [J])
8:                  If Bbox.B[i] ∩ Bbox.C[J] ≠ 0
9:                  D = Get the list of Door-Elevator
10:         End For
11: End For
10: For I in A
11: For J in D
12:         If A[I].RelatedBuildingElement.GlobalID ==D[J].Door.GolabId
13:         Get the list of Elevator-Space (A[I].RelatingSapce; D[J].Door)
14: End For
15: End For
```

Les listes de voisinages horizontaux et verticaux sont provisoirement stockées dans un fichier Excel. La concaténation de toutes ces listes permet de construire le premier graphe (Macro), qui est à la base de la construction des graphes suivants (Externe puis Interne), comme le décrit la section suivante.

4.5.2 Construction des graphes

L'algorithme 6 ci-dessous permet de construire le graphe Macro à partir de la liste des espaces voisins issue des traitements précédents. Il s'agit d'extraire de cette liste les espaces concernés, de les localiser en calculant et en leur attribuant le centre de gravité de l'élément géométrique correspondant (représentant les nœuds du graphe Macro dans la fenêtre graphique), puis de relier géométriquement les nœuds voisins par des arcs, matérialisés par des segments de droites dans la fenêtre graphique, ce qui est possible dans OCC en utilisant la fonction **OCC.BRepBuilderAPI.BRepBuilderAPI_MakeEdge**.

Algorithme* 6: *Construction du graphe Macro

```
1:  A= list of neighboring spaces
2:  For I in A
4:      B= get the bounding box centre of element in list A: OCC.Utils.Common.center_boundingbox ()
5: End For
5:  For I in B
6:      G_macro = Connect the neighboring node with Edge:
OCC.BRepBuilderAPI.BRepBuilderAPI_MakeEdge(B[I](1),B[I](2)).Edge()
7: End For
```

L'algorithme 7 présenté ci-dessous permet de construire le graphe Externe à partir des listes de voisinages. L'approche est similaire à celle utilisée pour construire le graphe Macro, mais cette fois ce ne sont plus seulement les espaces, mais aussi les transitions qui forment les nœuds du graphe, auxquels sont attribuées les coordonnées géométriques des centres de gravité des éléments considérés (espaces ou transitions). Pour construire le graphe Externe, BiMov prend aussi en compte le profil de navigant (il y a donc, de manière logique, un graphe par navigant). Si le navigant se déplace au sol, les sommets associés aux nœuds du graphe sont projetés au sol, en utilisant la fonction OCC **GeomAPI_ProjectPointOnSurf ()**. La position du sol est déduite de la position de la face supérieure de la dalle de l'espace considéré. Enfin, les sommets associés aux nœuds du graphe sont reliés par des segments de droites qui représentent géométriquement les arcs du graphe Externe.

Algorithme* 7: *Construction du graphe Externe

```
1: A= list of space with connected transition
2: For I in A
4:      B= get the bounding box centre of element in list A: OCC.Utils.Common.center_boundingbox ()
5: End For
6: For I in B
7:          IF MOoP == "Walking" or "Rouling"
8:          Project the bounding box centre on the floor using GeomAPI_ProjectPointOnSurf()
6:          G_externe = Connect the space and correspond transition with Edge:
OCC.BRepBuilderAPI.BRepBuilderAPI_MakeEdge(B[I](1),B[I](2)).Edge()
7: End For
```

L'algorithme 8 présenté ci-dessous résume les principales étapes de construction du graphe Interne à l'intérieur d'un espace. Il s'agit, dans un premier temps, d'extraire la liste des espaces considérés, et de consulter le rayon d'encombrement (distance D) associé au profil de navigant, disponible dans le modèle de navigant. Pour chaque espace considéré, BiMov génère un maillage aléatoire 2D sur le sol, si le navigant roule ou marche, un maillage 3D si le navigant peut voler. Le maillage est construit en utilisant la fonction d'OCC **BRepMesh_IncrementalMesh**, qui permet de créer le maillage par triangulation d'une face (le cas 2D) ou d'un volume (le cas 3D). **BRepMesh_IncrementalMesh** utilise deux paramètres, la déflexion linéaire et angulaire, qui vont être utilisés pour gérer la densité du maillage. Ce processus conduit à créer un graphe interne non réduit ($G_{interne_intial}$). La deuxième étape consiste à raffiner $G_{interne_intial}$ obtenu, en supprimant les nœuds qui sont inclus dans l'empreinte au sol des obstacles, si on a un déplacement au sol, ou dans la boîte englobante des obstacles, si on a un déplacement en l'air, ainsi que les arcs connectés à ces nœuds. La deuxième étape conduit à créer le $G_{interne}$.

Algorithme* 8: *Construction du graphe Interne

1: A= list of space with connected transition
2: Get type of MOoP
3: **For** I **in** A
4: **IF** MOoP == "Walking" or "Rouling"
5: Generate a 2D mesh
6: **ELSE**
7: Generate a 3D mesh
8: Build $G_{interne_intial}$ (N; E): **BRepMesh_IncrementalMesh**
9: **End For**
10: **For** I **in** A
11: Generate the foot print of obstacles in 2D cases and bounding box of obstacles in 3D cases
12: **For** N **in** $G_{interne_intial}$
13: **If** the node N ϵ footprint or Bounding Box obstacles
14: Delete N and connected edges
15: **ELSE**
16: $G_{interne}$= ($N_{accessible}$; E)
17: **End For**
18: **End For**

4.5.3 Réduction des graphes

La réduction des graphes permet de supprimer les nœuds nom accessibles, soit à cause de l'encombrement du navigant, soit à cause de l'indisponibilité d'un nœud. Cela concerne les graphes Externe et Interne.

4.5.3.1 Réduction du graphe Externe

L'algorithme 9 ci-dessous résume les ensembles de vérifications géométriques et sémantiques utilisées pour réduire le graphe Externe. Il s'agit de parcourir les nœuds du graphe Externe produit par l'algorithme 7 et d'appliquer à chaque nœud certaines vérifications, selon leur type. Si le nœud représente un espace, BiMov compare l'habilitation du navigant avec le niveau d'habitation minimum exigé pour accéder à cet espace, ainsi que l'état de l'espace. Si le nœud représente une porte, BiMov compare la largeur et la hauteur de la porte avec les dimensions du navigant, pour savoir si cette porte est franchissable ou non. Les caractéristiques géométriques (dimensions) et sémantiques (type, fonction) des constituants du bâtiment sont extraites du modèle IFC, dans lequel elles se présentent sous forme d'attributs (ou ensemble de propriétés : P-set). Par exemple, pour la hauteur de la porte, on utilise **OveralHeight,** pour la largeur **OveralWidth,** pour la capacité maximale de l'ascenseur on utilise **CapacityWeight,** etc. Les caractéristiques du navigant sont extraites du modèle externe de navigant. Le même principe s'applique pour la prise en compte de l'état des espaces et transitions. Pour chaque espace considéré, pour chaque transition considérée, BiMov consulte le calendrier et y retrouve la ligne qui lui correspond. Connaissant l'instant (immédiat ou planifié) saisi par le navigant pour requérir un itinéraire,

BiMov détermine, dans la ou les colonnes correspondantes du calendrier, si le nœud est accessible ou non. Lorsque les cellules d'intersection sont vides, cela veut dire que l'élément est disponible. Si elles contiennent un code différent, cela veut dire que l'élément est occupé, le code correspondant à un motif d'inaccessibilité, sur lequel on peut éventuellement transiger pour autoriser ou non le navigant à s'y déplacer (par exemple, en situation d'urgence).

Algorithme* 9 : *Réduction du graphe Externe

1: $G_{externe}$ = (N; E)
2: Get the data of MOoP;
3: Get the state of Node from calendar model
4: **For** I **in** G
5: **IF** Node N represents a space**:** check the authorization of MOop: $Ha_{MOoP} \geq Ha_{minimum\ required}$
6: Keep the Node
7: **ELSE**
8: delete the Node and connected Edges
9: **End For**
10: **For** I **in** G
11: **IF** Node N represents a Door**:** ifcDoor.OveralHeight ≥ H_{MOoP} **AND** ifcDoor.OveralWidth ≥ 2*D **AND** State == 0
12: Keep the node
13: **Else**
14: Delete the node and connected Edges
15: **End For**
16: **For I in G**
17: **IF** Node N represents a stair: S== "T" **AND** IfcStair.RequiredHeadroom ≥ H_{MOoP} **AND** IfcStair.TreadLengthAtInnerSide ≥ 2*D **AND** State == 0
18: Keep the node
19: **ELSE**
20: Delete the node and connected Edges
21: **End For**
22: **For I in G**
23: **IF** Node N represents a Rampe: IfcRamp.RequiredSlop≤ P_{MOoP} **AND** IfcRamp.RequiredHeadroom ≥ H_{MOoP} **AND** Largeur Rampe ≥ 2*D **AND** State == 0
24: Keep the node
25: **ELSE**
26: Delete the node and connected Edges
27: **End For**
28: **For I in G**
29: **IF** Node N represents an elevator: Ifc.TransportationElement.capacityWeight ≤ M_{MOoP} **AND** Ifc.TransportationElement.ClearHeight ≥ H_{MOoP} **AND** Ifc.TransportationElement.ClearWidth ≥ 2*D **AND** Ifc.TransportationElement.ClearDeep ≥ 2*D **AND** State == 0
30: Keep the node
31: **ELSE**
32: Delete the node and connected Edges
33: **End For**
34: $G_{Externe\ Reduced}$ = (N; E) with N is a set of kept nodes

4.5.3.2 Réduction du graphe Interne

Au niveau interne, la réduction du graphe résulte de la création d'une zone tampon à éviter, autour des obstacles. Si l'obstacle est un mur ou un poteau, BiMov extrait les

polygones (IfcPolyline) qui délimitent l'espace, qui correspondent à la limite extérieure des murs. Ensuite, BiMov extrait l'ensemble des points cartésiens (IfcCartesianPoint) de chaque polygone et translate une copie de ces points cartésiens vers l'intérieur de l'espace, d'une distance D, pour créer par la suite les zones tampons aux frontières de l'espace considéré. Si les obstacles sont des meubles et des équipements, les zones tampons seront des polygones (en 2D) qui entourent l'empreinte au sol de l'obstacle ou des polyèdres (en 3D) qui entourent l'obstacle. Pour accélérer le temps de calcul, on peut limiter l'opération aux boîtes englobantes des obstacles : les coordonnées de la boîte seront calculées à partir des coordonnées maximales et minimales de la boîte englobante de l'obstacle. Lorsque les zones tampons sont créées, chaque nœud du graphe interne se trouvant à l'intérieur de la zone tampon sera considéré comme non accessible. L'algorithme 10 ci-dessous se focalise sur la considération de l'encombrement physique du navigant, les autres vérifications sont similaires à celles présentées dans le cas de la réduction du graphe Externe (prise en compte de l'habilitation, de l'aptitude de déplacement, de l'état de l'espace).

Algorithme 10 : Réduction du graphe Interne (encombrement physique du navigant)

1: $G_{interne}$ = (N; E)
2: Get the data of MOoP;
3: Get the state of Node from calendar model
4: A= list of obstacle walls, furniture's, equipments
4: **For** I **in** A
5: **IF** A [I] == "Wall" or "Furniture"
6: Create a buffer space around obstacles with Width= D
7: **ELSE** A [I] == "equipment"
8: Create a buffer area around obstacles with Width = D + Safety distance
9: **End For**
10: **For** I **in** G
11: **IF** Node N ϵ buffer area
12: Delete the node and connected Edges
13: **Else**
14: Keep the Node
15: **End For**
15: $G_{\text{Interne Reduced}}$ = (N; E) with N is a set of kept nodes

Concernant la prise en compte du temps pour vérifier l'état d'espace et de transition, le pseudo-code ci-dessous explicite l'algorithme développé pour la troisième option (validité sur tout le trajet au moment du passage). Il s'agit de consulter la vitesse du navigant et le chemin calculé selon la première option (valable au départ). L'étape suivante est le calcul du temps nécessaire pour parcourir chaque tronçon du chemin ΔT. Ensuite, une estimation du temps d'arrivée à chaque nœud du chemin en fonction du ΔT est calculée. Enfin, l'état de chaque nœud est vérifié à chaque instant estimé d'arrivée sur ce nœud.

Algorithme 11: Option 3-validité sur tout le trajet au moment du passage

1: Get the velocity (V) of MOoP from MOoP model;
2: Get the state of Node from calendar model
3: Path = (N; E)
4: **For** E **in** Path
5: cumpute the time to travel the edge ΔT (Dedge / V_{MOoP})
6: **For** N **in** Path
7: compute the estimated time to arrive at each node $T_i = T_{i-1} + \Delta T_i$
8: check the state for each node at the corresponding instant Ti
9: **End For**
10: **End For**

4.6 IHM dédiée à l'exploitation de BiMov par le navigant

Une IHM dédiée aux navigants a été développée pour qu'ils puissent solliciter les services de BiMov. L'architecture de cette interface est illustrée dans la Figure 73. L'utilisateur doit d'abord importer le modèle de bâtiment dans lequel il souhaite planifier son chemin. Ensuite, il doit choisir le niveau de détail (Macro, Externe ou Interne) et identifier son propre profil de navigant à partir d'une liste déroulante. Ensuite, il doit spécifier l'espace de départ et celui d'arrivée. Enfin, il doit spécifier l'heure du départ et choisir l'option de prise en compte du temps. Il ne reste alors qu'à lancer le calcul automatique (**Run**). Il va de soi que la souscription préalable à un service en ligne, couplé à la reconnaissance automatique de son profil, par exemple via son Smartphone ou un tag RFID, et à la géolocalisation indoor du navigant, non seulement dans le bâtiment concerné, mais aussi dans l'espace où il se trouve, rendrait ces saisies totalement inutiles. Elles ne sont nécessitées que par les limitations du prototype BiMov.

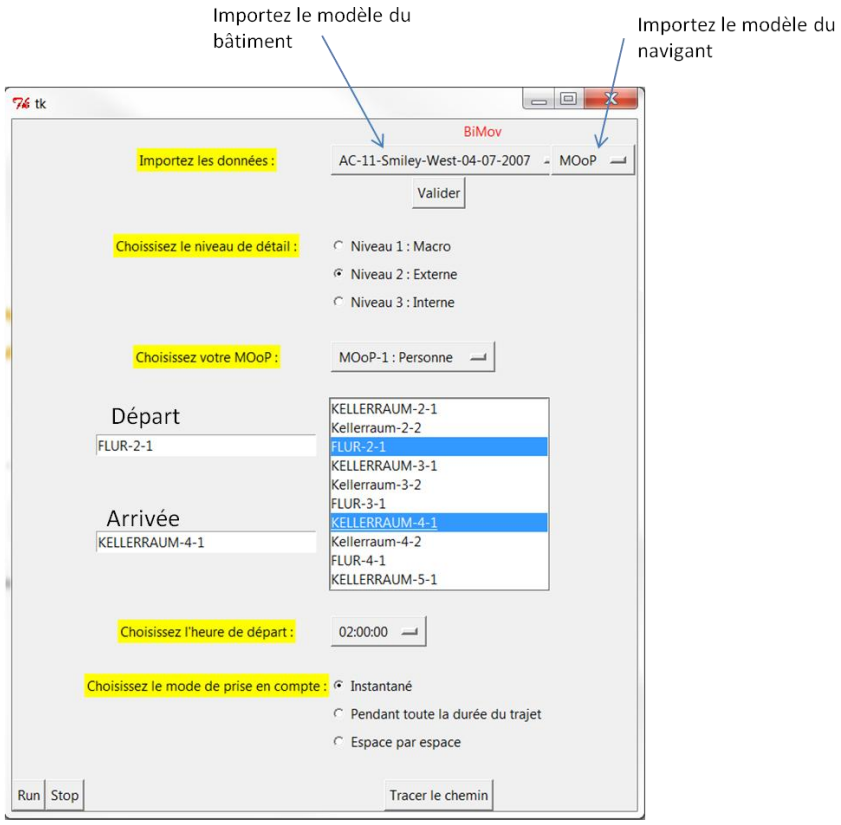


Figure 73 : Interface Utilisateur

En guise de résultat, l'utilisateur pourra visualiser le chemin tracé sur l'interface graphique d'OpenCascade. Il pourra changer le mode de prise en compte de temps et tracer le nouveau chemin sans relancer le calcul.

4.7 Conclusion

Le quatrième chapitre a exposé les développements qui ont été réalisés dans le cadre de ces travaux de thèse. Le modèle BIM en format IFC dans sa version 2x3 a été adopté pour représenter le modèle de bâtiment exploité en entrée du système BiMov, ce choix étant justifié par la richesse des informations qui y décrivent sémantiquement et géométriquement les constituants physiques du bâtiment.

Pour implémenter le système BiMov décrit au troisième chapitre, le code open source IfcOpenShell a été utilisé. Celui-ci permet de lire un modèle IFC, de naviguer dans ce modèle, de développer en Python des algorithmes de consultation ou de calcul géométrique, enfin de visualiser le modèle en 3D.

Les modèles de données de navigants et de calendriers ont été développés sous forme de grilles Excel. Ils sont destinés à être gérés par un ou plusieurs gestionnaires, pour lesquels des macros d'exploitation et des IHM spécifiques ont été écrites.

Plusieurs algorithmes ont été développés pour combler les faiblesses du modèle topologique d'un bâtiment en format IFC et expliciter les notions de voisinage entre espaces, à partir de raisonnements sur les informations géométriques (dimensions, coordonnées) et sémantiques (nature et fonction des espaces, transitions, obstacles). Ces algorithmes permettent de construire les graphes de navigation à différents niveaux.

Un ensemble d'IHM a été développé pour permettre la communication entre BiMov et ses utilisateurs, ce qui leur permet de choisir un bâtiment, d'identifier leur profil, de spécifier leur besoin (espace de départ, destination, heure de départ, modalité de calcul). L'itinéraire peut être visualisé dans la fenêtre graphique 3D d'OCC ou bien textuellement sous forme d'une séquence d'espaces et de transitions à parcourir pour parvenir à destination.

Le chapitre suivant présente quelques cas d'études sur lesquels les algorithmes présentés dans ce chapitre ont été exécutés pour illustrer les fonctionnalités de BiMov.

Chapitre 5 : Cas d'études

5.1 Introduction
5.2 Préparation des données
5.2.1 Modèles de bâtiments utilisés comme cas d'études
5.2.2 Profils de navigants (User Profiles)
5.3 Scénarios de planification de chemin
5.3.1 Au niveau Macro
5.3.2 Au niveau Externe
5.3.3 Au niveau Interne
5.4 Conclusion

5.1 Introduction

Après avoir présenté au cours des chapitres précédents les concepts théoriques, puis les développements informatiques entrepris pour les valider, le présent chapitre a pour objet d'illustrer les principaux scénarios réalisables au moyen de ces développements, dans le cadre du système BiMov. Ces scénarios auront pour but de mettre en évidence la pertinence et l'originalité du système proposé, pour répondre à la problématique de planification automatique de chemin dans un bâtiment décrit par sa maquette BIM au format IFC.

Plusieurs modèles de bâtiments, représentant différents niveaux de complexité, sont utilisés comme cas d'études. Le chapitre est structuré comme suit : une première partie décrit les différents modèles de bâtiments, ainsi que les différents profils de navigants qui seront utilisés dans les scénarios d'études. Une seconde partie décrit le déroulement des scénarios illustratifs. Le chapitre se termine par une conclusion qui reprend les principaux enseignements que l'on peut tirer de ces illustrations.

5.2 Préparation des données

5.2.1 Modèles de bâtiments utilisés comme cas d'études

Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi d'utiliser des cas d'études d'origine externe. Ce choix s'explique d'une part par la volonté de démontrer que nos propositions ne nécessitent pas de contraindre la construction de la maquette numérique du bâtiment d'une manière non standard qui leur soient favorable, d'autre part par la faible valeur ajoutée, au regard du temps considérable que cela représenterait, de produire nous-mêmes des maquettes numériques de bâtiments. Plusieurs modèles IFC ont été trouvés sur Internet, notamment sur le site de l'université d'Auckland en Nouvelle-Zélande (*http://openifcmodel.cs.auckland.ac.nz*), qui propose une base ouverte de modèles IFC. D'autres modèles, plus simples (*ifcopenshell.com*) ou plus complexes (*http://www.ifcwiki.org),* ont été utilisés lors de la mise au point des développements.

Trois modèles IFC ont été sélectionnés pour illustrer les fonctionnalités de BiMov :

- Le **modèle 1** «*AC-11-Smiley-West-04-07-2007.ifc*» : comprend 70 espaces divisés sur 5 blocs et 5 étages par bloc, 85 portes, 40 fenêtres, 15 escaliers (3 escaliers par bloc), 141 murs et 1213 relations de frontières (IfcRelSpaceBoundary). L'intérêt de ce modèle est d'induire la nécessité de considérer un cheminement en partie à l'extérieur de l'ensemble, pour pouvoir se déplacer d'un bloc à un autre (Figure 74).

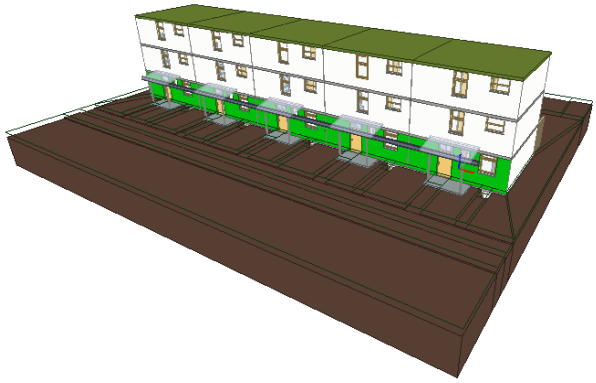


Figure 74 : Modèle *AC-11-Smiley-West-04-07-2007.ifc*

- Le **modèle 2** «*conference-centre.ifc*» : comprend 243 espaces distribués sur 4 étages, 198 portes, 226 fenêtres, 14 escaliers, 1 ascenseur, 849 murs et 8969 relations de frontières (Figure 75). Son principal intérêt est d'offrir une alternative, pour la navigation verticale, entre escalier ou ascenseur.

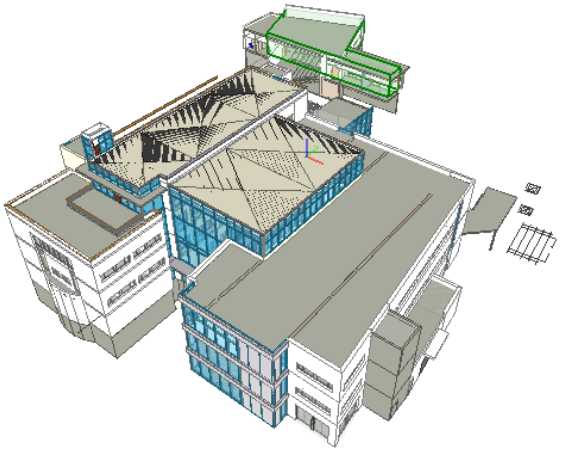


Figure 75 : Modèle *conference-centre.ifc*

- Le **modèle 3** «0319EngineeringBuilding.ifc» : comprend 134 espaces répartis sur 5 étages, 142 portes, 307 fenêtres, 10 escaliers, 448 murs et 2632 relations de frontières (Figure 76). Ce modèle démultiplie les possibilités de navigation horizontale comme verticale.

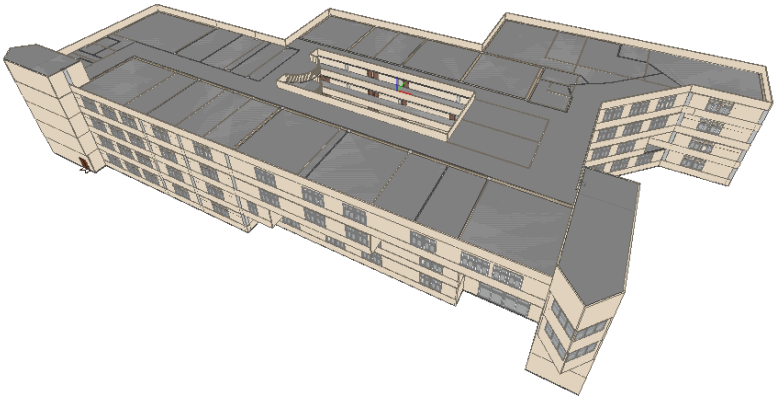


Figure 76 : Modèle 0319EngineeringBuilding.ifc

5.2.2 Profils de navigants

Pour mettre en évidence les contraintes qui influencent la planification de chemin en fonction des caractéristiques des navigants, différents profils de navigants ont été créés et confrontés aux mêmes modèles de graphes. Ces profils se différencient par leur taille, leurs habilitations et leurs aptitudes à la mobilité. Le Tableau 6 ci-dessous résume les caractéristiques du jeu de navigants qui ont été créés pour exécuter les scénarios. Concernant le navigant «Transpalette (LWE130)», les caractéristiques sont extraites du catalogue de son fabriquant (*http://www.manutentionservice.fr*).

Tableau 6 : Caractéristiques des profils de navigants

	Visiteur	Agent de maintenance	Transpalette	Drone
L [m]	0,346	0,346	1 ,57	0.35
l [m]	0,63	0,63	0,7	032
H [m]	1,763	1,763	1,27	0.16
Tx [Boolean]	T	T	T	T
Ty [Boolean]	T	T	F	T
Tz [Boolean]	F	F	F	T
Rz [m]	0	0	1,41	x
Rx [m]	-1	-1	-1	x
Ry [m]	-1	-1	-1	x
M [kg]	83	83	255	x
P [deg]	15	15	2,85-5,71	x
S [Boolean]	T	T	F	x
Ha [] [Boolean]	(V0)	(M1)	(T0)	x
V [m/s]	1	1	1,2	x

Les profils utilisés ont été caractérisés dans l'environnement BiMov par le biais des services de gestion, conformément aux propositions formulées dans le chapitre 4.

5.3 Scénarios de planification de chemin

Les sections suivantes illustrent l'exécution et les résultats des fonctions de planification de chemin, suivant les 3 niveaux de détail suggérés par notre méthode.

5.3.1 Au niveau Macro

Cette section se focalise sur la mise en évidence de l'intérêt du modèle de graphe Macro, qui permet de relier les espaces voisins lorsqu'une relation topologique existe entre eux. Les 2 premiers modèles de bâtiments («*AC-11-Smiley-West-04-07-2007*» et «*conférence-centre»)* sont analysés.

Concernant le modèle 1, le graphe Macro est représenté dans l'interface OCC (Figure 77). Le symbole «Esp» localise le centre de gravité d'un espace et les lignes rouges représentent les arcs du graphe. Les résultats trouvés montrent que la conception de ce modèle est validée par rapport à l'accessibilité. Les nœuds qui représentent les espaces intérieurs sont tous connectés et il n'existe aucun nœud isolé, ce qui signifie que tous les espaces sont accessibles, que ce soit au moyen des THs ou des TVs.

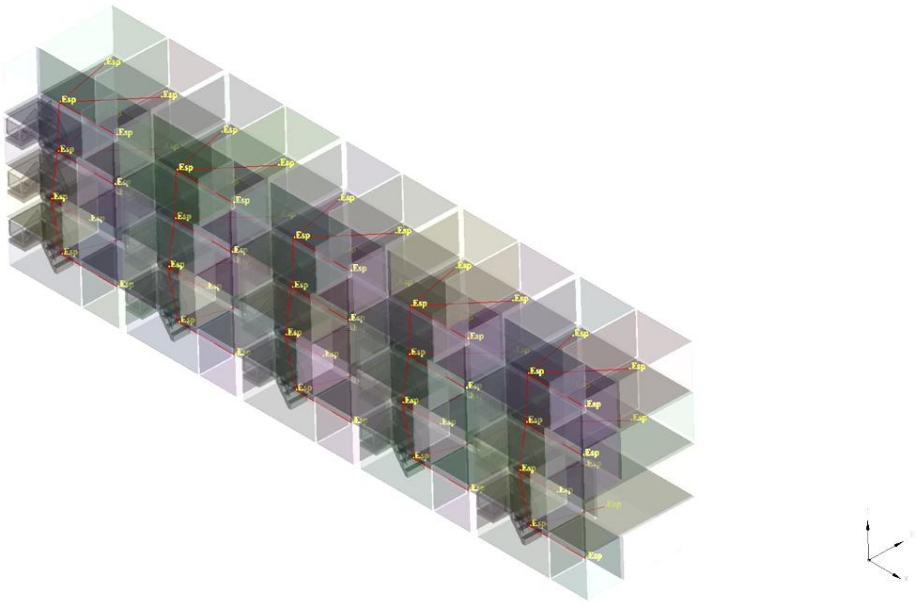


Figure 77 : Graphe Macro «Modèle 1»

En revanche, le graphe Macro généré sur le modèle 2 montre qu'il existe des incohérences de conception dans le modèle de bâtiment (Figure 78). Plusieurs espaces isolés sont repérés au quatrième étage. Ce diagnostic est confirmé visuellement au

moyen du logiciel BIMVision. La Figure 79 montre une capture d'écran de l'étage qui intègre des espaces isolés. On remarque que tous les espaces ne présentent pas au moins une transition. BiMov fournit la liste des nœuds isolés repérés, qui peuvent être visualisés sur l'interface OCC (Figure 78) ou bien à partir des listes de voisinage (espace-transition-espace). La possibilité de produire un diagnostic automatisé peut grandement aider l'architecte à identifier (puis corriger) les défauts de conception. Cela réduit aussi le risque de ne pas détecter ces défauts par une exploration seulement visuelle de la maquette numérique. L'utilisation de BiMov à ce niveau très limité de détail permet de gagner du temps et de réduire l'effort d'analyse critique des concepteurs du bâtiment.

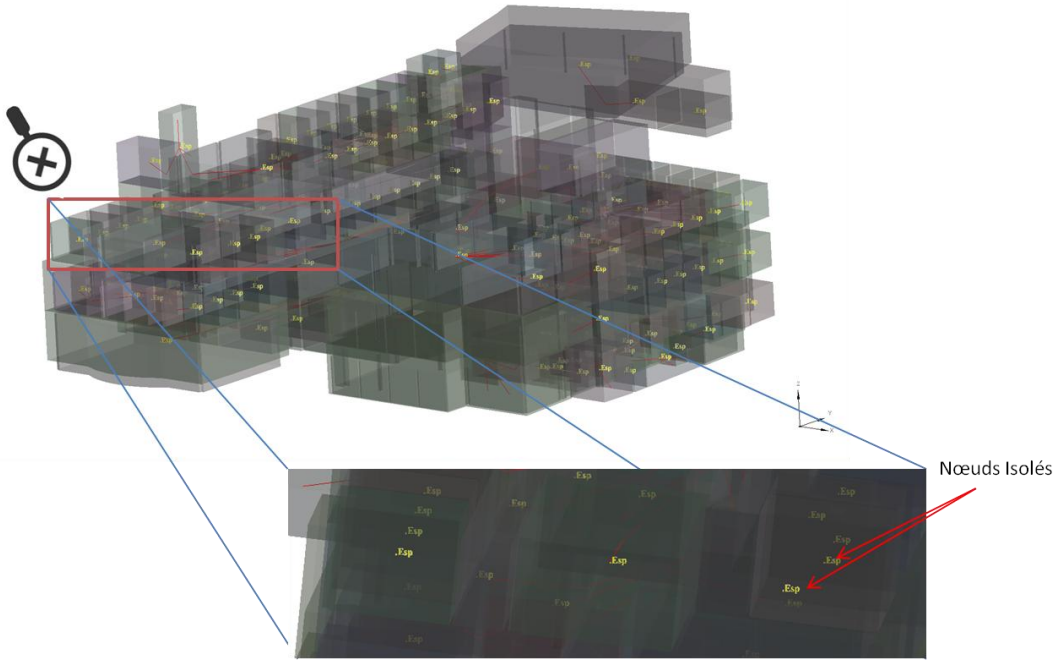


Figure 78 : Graphe Macro «modèle 2»

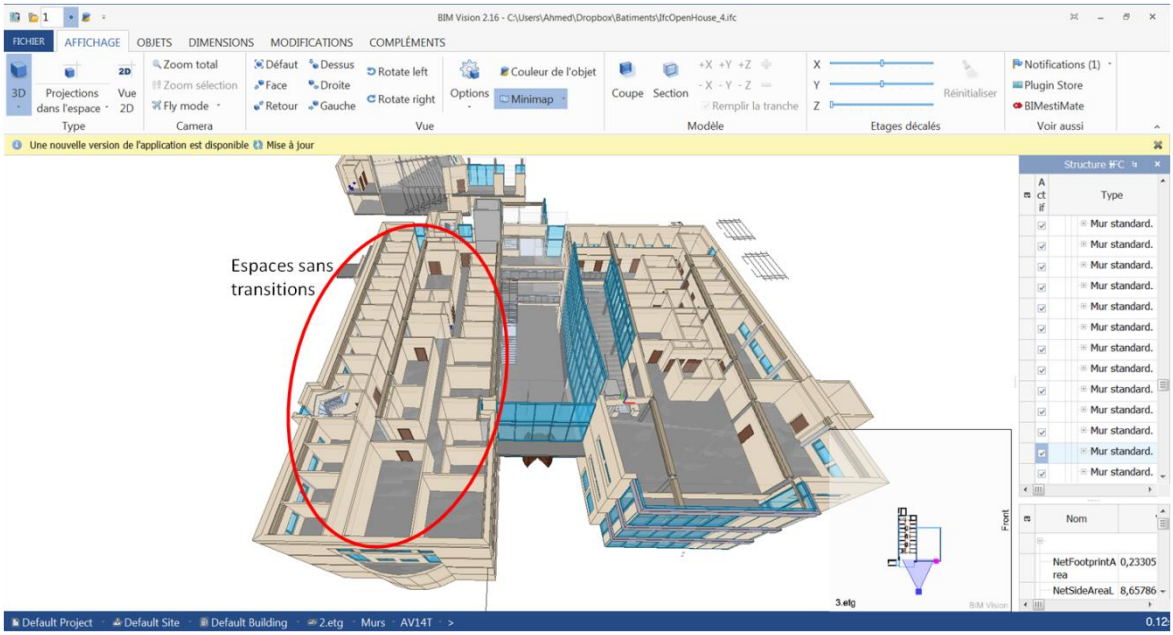


Figure 79 : Visualisation des défauts de conception dans le modèle 2

5.3.2 Au niveau Externe

Le scénario suivant permet de mettre en évidence la prise en compte des caractéristiques du navigant et des états des espaces comme des transitions. Deux scénarios complets sont présentés, pour les trois premiers profils de navigants, avec ou sans perturbation de calendrier. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle 3.

1. **<u>Scénario 1 : sans perturbation de calendrier</u>**

Les circonstances de ce scénario sont :

- Bâtiment : Modèle 3,
- Niveau de détail : Externe,
- Navigants testés : (1) Visiteur; (2) Agent de maintenance; (3) Transpalette,
- Départ : espace 115 (RDC); arrivée : espace 416 (quatrième étage),
- Heure de départ : 12:00, sans aucune perturbation à signaler (tout les espaces et les transitions sont accessibles).

Le modèle 2 contient deux escaliers, afin de mettre en évidence l'influence de l'habilitation du navigant. Nous avons affecté une habilitation minimale qui vaut (P, M1) à l'un des deux escaliers, ce qui veut dire que cet escalier est réservé aux navigants qui sont titulaires d'une habilitation qui vaut au moins P ou M1 (P correspond à la catégorie «personnel», M au profil «agent de maintenance»).

Pour le «visiteur», le chemin trouvé par BiMov est illustré dans la Figure 80. On observe qu'il doit emprunter l'escalier réservé aux visiteurs. Le chemin empruntant

l'escalier de service ne lui est pas proposé (défaut d'habilitation), bien que ce chemin soit plus court.

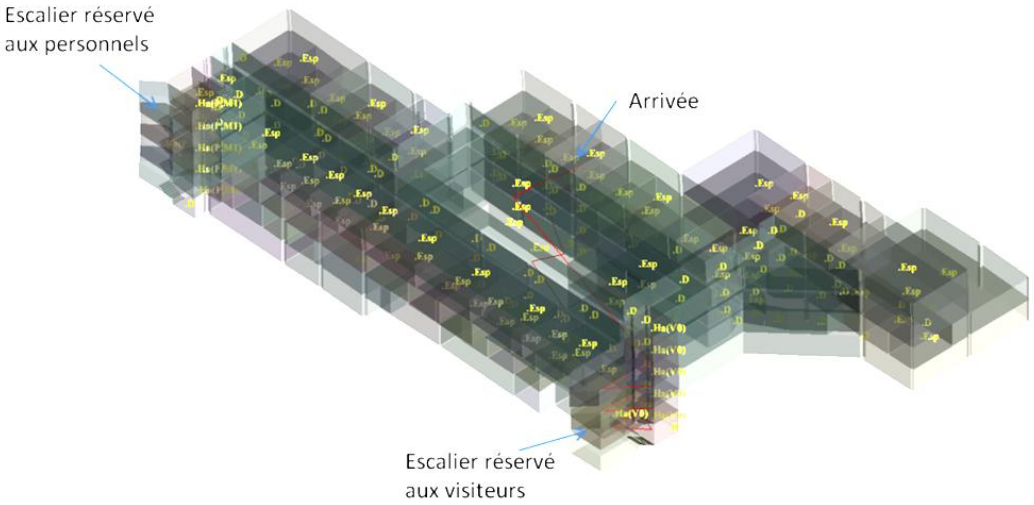


Figure 80 : Chemin proposé à un visiteur sans perturbation

Pour le profil «agent de maintenance», dans les mêmes circonstances (absence de perturbation), BiMov génère un chemin empruntant l'escalier réservé aux personnels et accessible aux agents de maintenance (Figure 81).

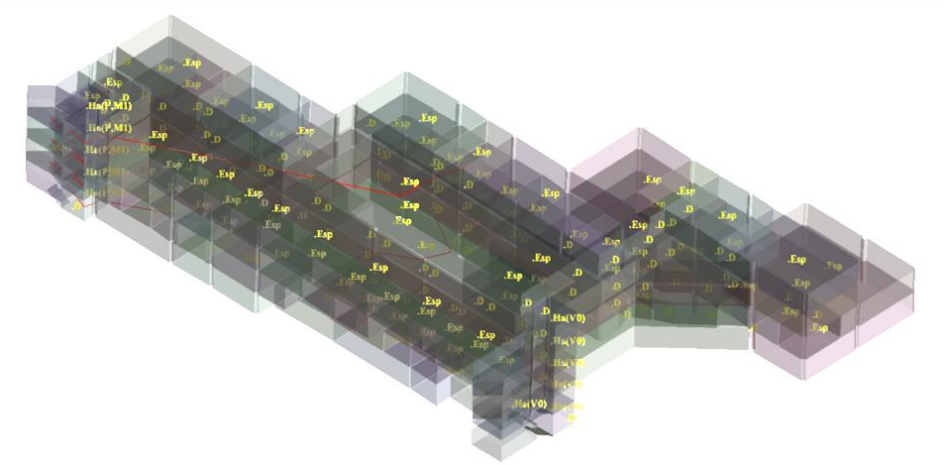


Figure 81 : Chemin proposé à l'agent de maintenance

Pour le profil «transpalette», aucun chemin n'a été trouvé, ce qui est justifié par le fait que ce profil ne peut pas emprunter un escalier (S [Boolean]=False) et que nous avons forcé, pour l'illustration, la non prise en compte d'un ascenseur (Figure 82).

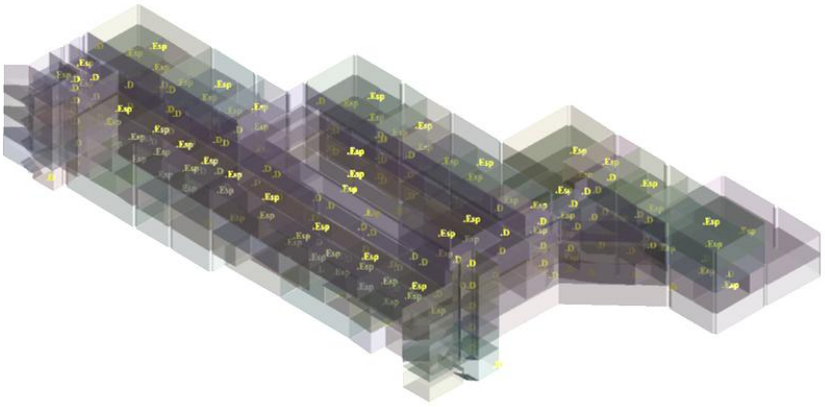


Figure 82 : Absence de chemin pour un profil de transpalette en l'absence d'ascenseur

La section suivante présente une variante des scénarios précédents. Cette fois, nous avons considéré la présence d'un ascenseur qui augmente les possibilités de déplacements des navigants et introduit une autre modalité de déplacement vertical. Les espaces qui forment la cage de l'ascenseur sont situés à côté de l'escalier réservé aux visiteurs. Aucune habilitation n'est nécessaire pour emprunter l'ascenseur. Nous introduisons aussi une perturbation dans le calendrier, et considérons la situation d'un navigant qui ne peut pas emprunter un escalier (transpalette).

En présence de l'ascenseur, la Figure 83 illustre le chemin trouvé pour le navigant «transpalette». Les vérifications géométriques pour franchir les portes sont validées (la distance D associée au transpalette vaut 0,43 m, donc 2*D< Largeur des portes qui vaut 0,9 m et la hauteur du transpalette H est inférieur à la hauteur des portes qui vaut 2,1 m). De plus, la masse du navigant est inférieure à la capacité maximale de l'ascenseur. En conséquence, BiMov autorise le transpalette à emprunter l'ascenseur.

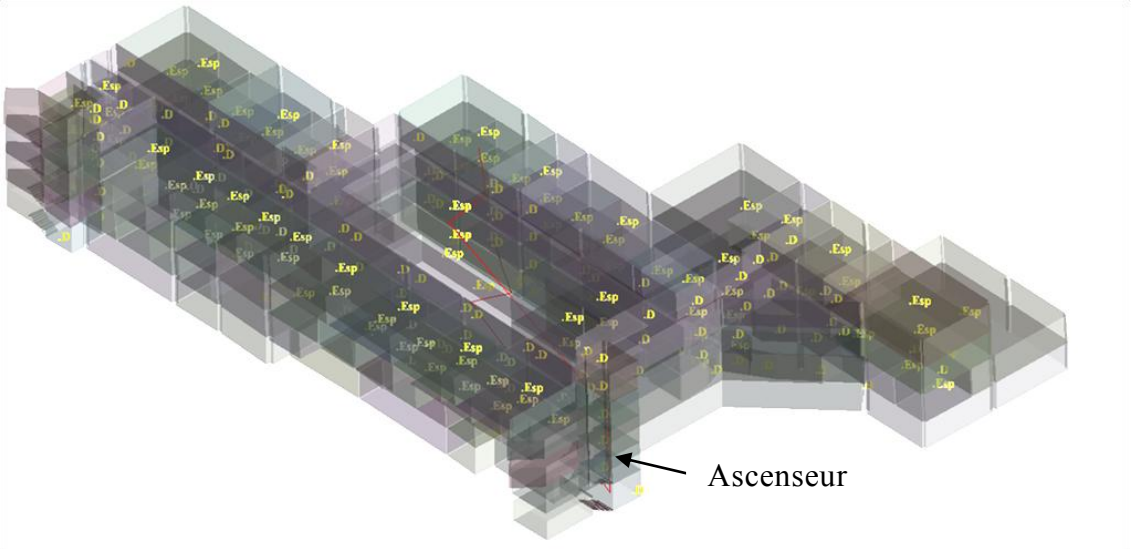


Figure 83 : Chemin du transpalette après la création de l'ascenseur

2. Scénario 2 : avec perturbation de calendrier

Les circonstances de ce scénario sont :

- Bâtiment : Modèle 3,
- Niveau de détail : Externe,
- Navigants testés : (1) Visiteur; (2) Agent de maintenance; (3) Transpalette,
- Départ : espace 408 (1ère étage); arrivée espace 210 (quatrième étage),
- Heure de départ 1 : 12:00 sans perturbation à signaler,
- Heure de départ 2 : 13:00 indisponibilité de l'ascenseur d'une durée 2h. Le motif de la perturbation une vérification périodique qui relève de la catégorie 2 «travaux de maintenance».

La Figure 84 illustre le chemin trouvé pour un «visiteur» pour un départ prévu à 12:00. Du point de vue géométrique, le chemin le plus court passe par l'escalier à côté de l'espace du départ, mais cet escalier est réservé aux personnels et aux agents de maintenance. BiMov trouve un autre chemin pour arriver à destination en empruntant l'ascenseur même si la distance à parcourir est plus longue. Pour un départ prévu à 13:00 (même navigant et même départ/arrivée), le nouveau chemin est illustré dans la Figure 85. On note que le chemin proposé à un visiteur à 13:00 est différent de celui proposé à 12:00, ce qui illustre le fait que l'indisponibilité de l'ascenseur a été prise en compte.

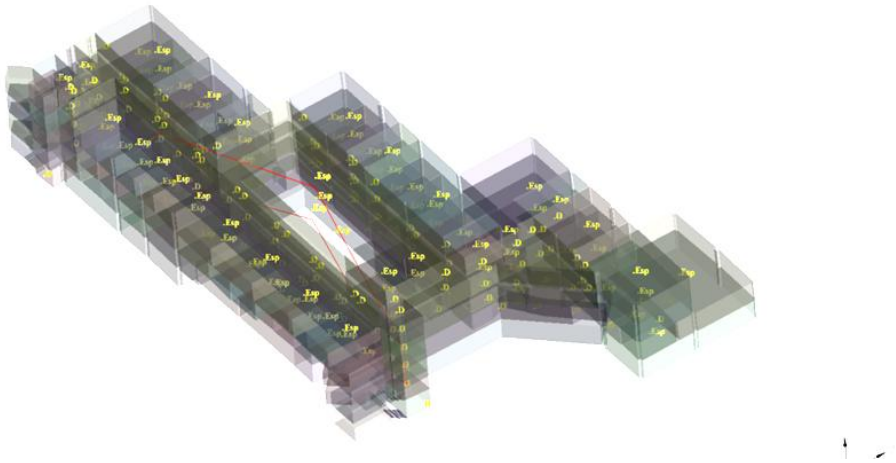


Figure 84 : Chemin proposé à un visiteur à 12:00

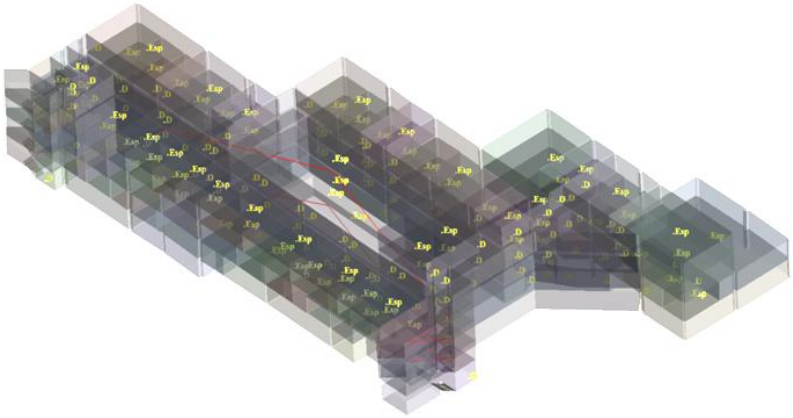


Figure 85 : Chemin proposé à un visiteur à 13:00

Les chemins sont représentés graphiquement dans l'environnement OpenCascade, mais sont aussi codés dans une table Excel, sous forme de séquences d'espaces et de transitions à parcourir pour arriver à destination. Le Figure 86 montre les résultats bruts obtenus.

B13 | fx | 210

	A	B	C
1	0	408	
2	1	__-__- (1):90 x 210 cm:90 x 210 cm:293936	
3	2	CORRIDOR 4	
4	3	__-__- (1):160 x 220 cm:160 x 220 cm:243898	
5	4	STAIR 4-1	
6	5	LANDING 4-1	
7	6	STAIR 3-1	
8	7	LANDING 3-1	
9	8	STAIR 2-1	
10	9	__-__- (1):160 x 220 cm:160 x 220 cm:241956	
11	10	CORRIDOR 2	
12	11	__-__- (1):90 x 210 cm:90 x 210 cm:271408	
13	12	210	
14			
15			
16			
17			

Espace de départ

Noms d'espace et des transition à parcourir

Espace d'arrivée

Figure 86 : Chemin optimal consigné en format texte

5.3.3 Au niveau Interne

L'intérêt de ce niveau de modélisation est de prendre en compte l'intérieur de chaque espace, c'est-à-dire l'éventuelle présence d'obstacles intérieurs (meubles, équipements et installations) qui peuvent réduire ou empêcher le déplacement d'un navigant encombrant dans un espace encombré.

Dans cette section, un même espace intérieur extrait du modèle 2, qui contient des meubles (modélisés par nos soins dans l'environnement OCC), est analysé par rap-

port à deux profils de navigants (le visiteur bipède et un drone), afin de vérifier la possibilité ou non de trouver un chemin intérieur pour ces navigants.

La Figure 87-1 ci-dessous montre le maillage aléatoire 2D du polygone frontière du sol d'un espace, avec une densité de 13 nœuds par mètre carré, avant la création des zones tampons, pour le profil «visiteur bipède». La Figure 87-2 montre le maillage réduit suite à la création d'une zone tampon au voisinage des murs, en prenant la valeur de décalage de 0,335 m adaptée à ce profil de navigant. La Figure 87-3 montre le maillage réduit après la création d'un meuble au milieu de l'espace et la création d'une zone tampon périphérique au meuble. Les nœuds à l'intérieur des zones tampons sont considérés comme inaccessibles et ne sont donc pas pris en compte dans le graphe interne. Enfin, le tracé vert de la Figure 87-4 met en évidence le plus court chemin intérieur sans collision avec les zones tampons trouvé entre les deux issues de l'espace.

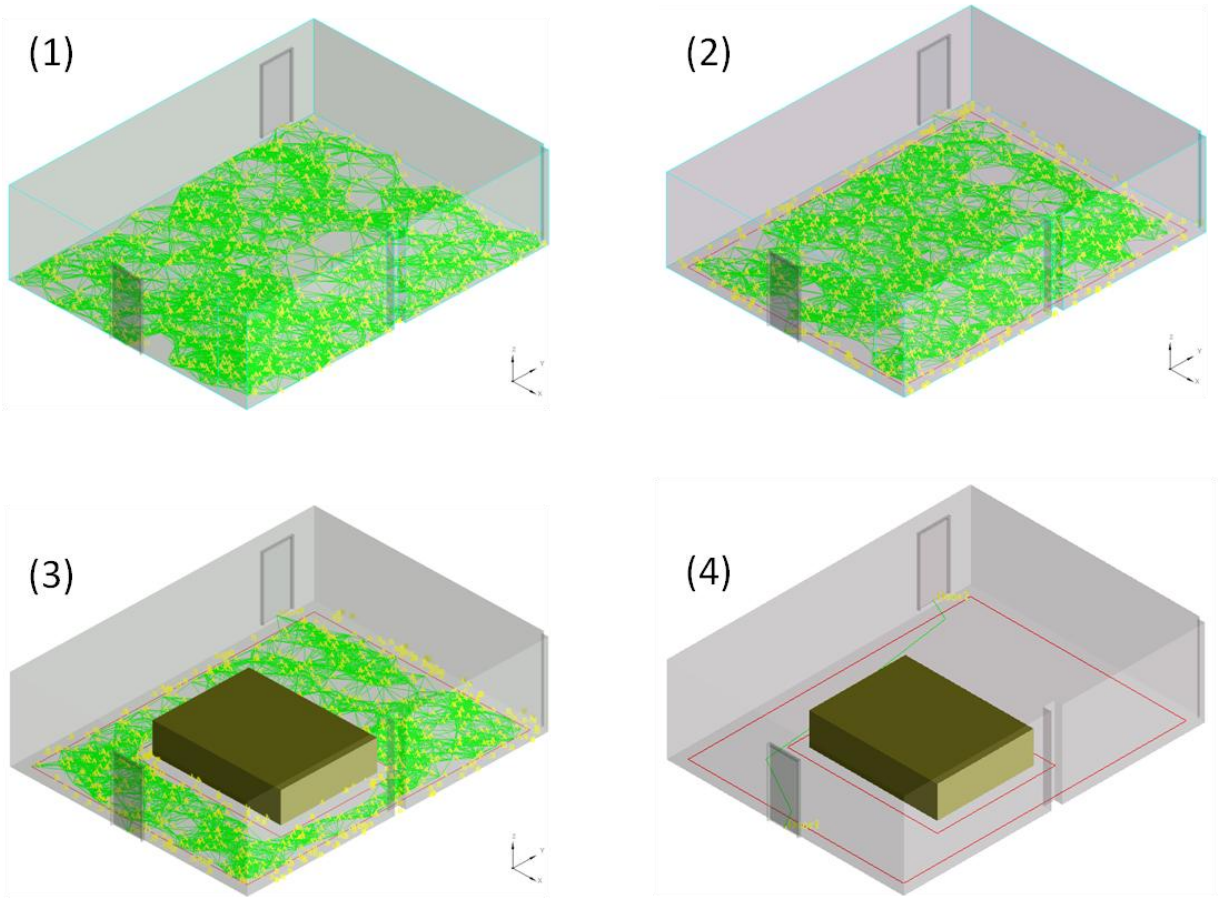


Figure 87 : Analyse de l'intérieur pour le profil «visiteur»

Si l'on considère un navigant de profil «drone», celui-ci se déplace dans l'air, ce qui implique de considérer un déplacement en 3D. Nous avons fixé une valeur de décalage arbitraire de 0.4 m. La Figure 88-1 montre le maillage aléatoires 3D de l'espace,

avec une densité de 15 nœuds par mètre cube. La Figure 88-2 et Figure 88-3 illustrent le maillage réduit après la création de zones tampons au voisinage du polyèdre des frontières de l'espace d'une part, autour des murs et des meubles d'autre part. Enfin, la Figure 88-4 montre le chemin le plus court trouvé pour le drone entre les deux portes de l'espace, qui est tracé en vert.

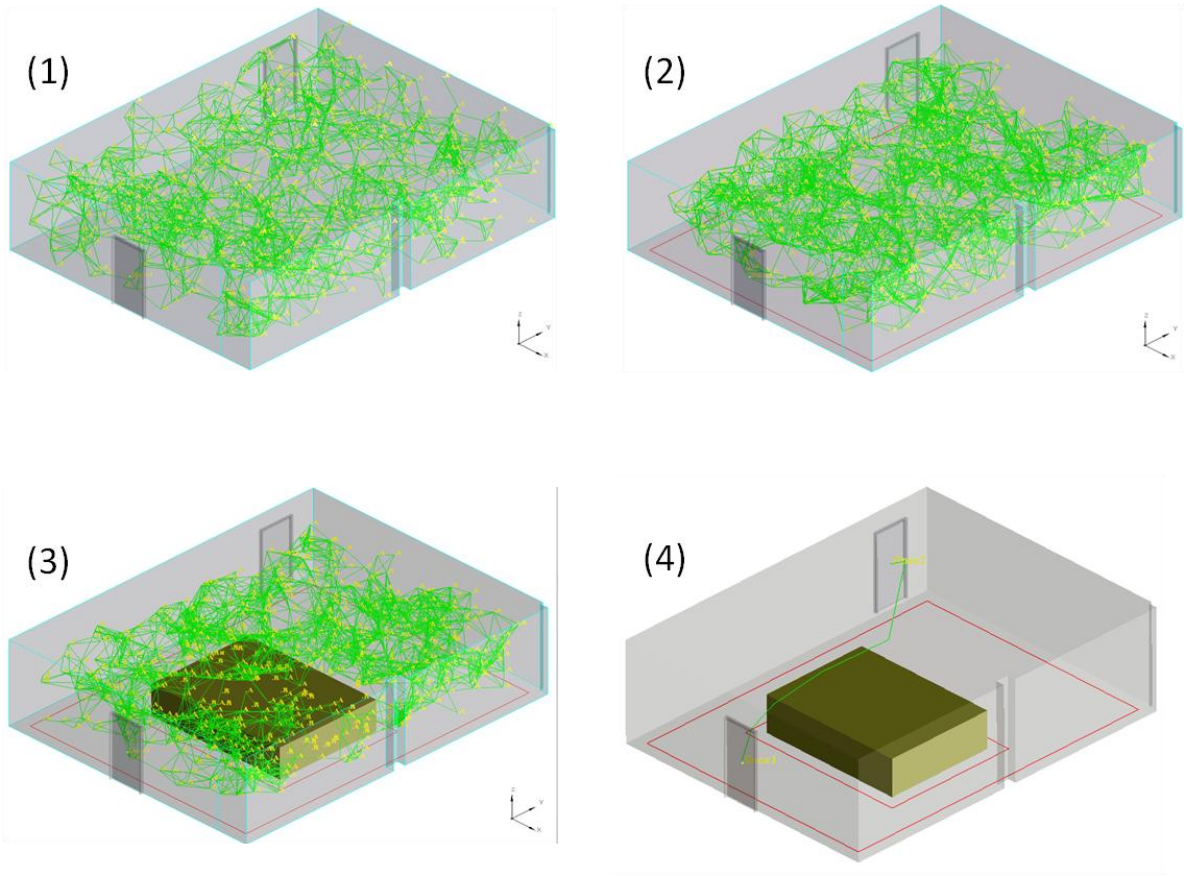


Figure 88 : Analyse de l'intérieur pour le profil «drone»

5.4 Conclusion

Ce cinquième chapitre a permis d'illustrer, au moyen de différents scénarios, les principales fonctionnalités de BiMov.

Au niveau Macro, deux modèles de bâtiment ont été testés. Les résultats ont montré que BiMov permet d'automatiser l'analyse de l'accessibilité de tous les espaces d'un bâtiment, lors du processus de validation d'une conception architecturale.

Au niveau Externe, un modèle de bâtiment susceptible de proposer différents chemins possibles entre deux mêmes points de départ et d'arrivée a été utilisé pour illustrer :

- Que le profil de navigant, dépendant de ses caractéristiques géométriques (encombrement), physiques (masse), d'aptitude au déplacement (notamment habilitation) peut être utilisé comme contrainte pour proposer un plus court chemin adapté au navigant.
- Que l'état de disponibilité/indisponibilité d'un espace peut être pris en compte pour proposer un chemin adapté aux circonstances temporelles de la recherche de chemin le plus court.

Au niveau interne, un même espace éventuellement encombré d'obstacles a été utilisé pour montrer, dans le cas d'une navigation horizontale, que BiMov était en mesure de confirmer ou d'infirmer les possibilités de navigation intérieure d'un navigant, en fonction de son encombrement, en dehors de zones tampons représentant les obstacles à éviter, en 2D pour un déplacement au sol, en 3D pour un déplacement dans l'espace.

Ces illustrations confirment donc l'aptitude de BiMov à trouver automatiquement, lorsque c'est possible, le plus court chemin à l'intérieur d'un bâtiment, en fonction du profil de navigant et de l'état conjoncturel des espaces et transitions du bâtiment.

Conclusion et perspectives

La révolution numérique bouleverse notre mobilité et nos comportements. A l'extérieur, nos voyages sont devenus plus fluides grâce aux nouvelles technologies qui permettent de rechercher des itinéraires, consulter des horaires, choisir un mode de transport. En revanche, le problème de planification de chemin se pose actuellement dans les environnements intérieurs en raison du développement rapide de l'urbanisation. Les bâtiments des grandes métropoles sont de plus en plus gigantesques, complexes et interconnectés. Ils contiennent de nombreux espaces de formes et de tailles variées, des zones dangereuses ou inaccessibles au public, différents types de transitions horizontales ou verticales, dont l'état d'accessibilité est susceptible de changer. Cela rend de plus en plus difficile, pour un navigant donné en milieu inconnu, la tâche de trouver son itinéraire vers un point d'intérêt à l'intérieur d'un bâtiment.

Le premier chapitre a montré l'intérêt d'un système de planification automatique de chemin intérieur et précisé les contraintes qui doivent être prises en considération lors de l'étude de cette problématique. En effet, la planification de chemin intérieur nécessite un référentiel qui représente le modèle du bâtiment capable de fournir toutes les informations nécessaires sur les possibilités de s'y déplacer d'un espace à un autre. De plus, il est indispensable de prendre en compte non seulement les caractéristiques du navigant auquel est destiné le service, afin de lui proposer un chemin adapté, mais aussi l'état conjoncturel d'accessibilité des espaces et transitions.

L'état de l'art proposé au deuxième chapitre a montré qu'il existe plusieurs modèles permettant de représenter l'intérieur d'un bâtiment, dont nous avons évalué et comparé les aptitudes à supporter la planification automatique de chemin. Cet état de l'art a mis en avant l'intérêt d'utiliser un modèle BIM en format IFC, en raison de sa richesse en informations géométriques et sémantiques sur les constituants physiques des bâtiments. Différentes approches de modélisation de navigants ont aussi été décrites et comparées pour faire émerger les caractéristiques à prendre en compte. Cet état de l'art a aussi porté sur l'identification et la comparaison de différentes approches de recherche ayant abordé la problématique de planification de chemin, inspirées d'une variété de cas d'application en phase de conception et d'exploitation de bâtiments. Les avantages comme les insuffisances des approches ont été soulignés afin de dresser les spécifications de notre propre proposition.

Dans le troisième chapitre, nous avons décrit notre proposition de recherche. Celle-ci, dénommée BiMov, est destinée à répondre aux besoins de plusieurs profils d'utilisateurs : elle aide les architectes et les ingénieurs à valider leur conception ; elle est aussi destinée aux utilisateurs désireux de planifier leur itinéraire dans le bâtiment. Le processus de BiMov consiste à analyser un modèle standard de bâtiment et

à le transformer en un modèle de graphe, à plusieurs niveaux de détail. Ces graphes sont alors réductibles en fonctions du profil de navigant, des obstacles à l'intérieur des espaces, et de la conjoncture de circulation. L'approche proposée s'appuie sur 4 modèles de données : (1) le modèle de bâtiment qui est le cœur de notre système et qui permet de représenter ses caractéristiques utiles pour la planification de chemin; (2) le modèle de navigant qui représente ses caractéristiques physiques, limites et capacités de déplacement; (3) un modèle de calendrier pour représenter l'état opérationnel de chaque espace et transition; (4) un modèle de graphe sur trois niveaux (Macro, Externe, Interne).

Pour prendre en compte le profil de navigant, BiMov s'est inspiré de l'approche de Minkowski-Sum, consistant à créer des zones tampons autour des obstacles. Les nœuds du graphe (Externe ou Interne) se trouvant dans les zones tampons sont éliminés. De plus, des ensembles des vérifications non géométriques sont appliqués pour prendre en compte l'habilitation et les limites de déplacement du navigant. En ce qui concerne l'aspect dynamique des espaces et transitions, BiMov récupère ces informations du modèle de calendrier et néglige les nœuds qui correspondent aux espaces indisponibles au moment du déplacement, avec trois options de calcul plus ou moins immédiates et précises.

Les détails d'implémentation d'un prototype informatique ont été décrits dans le quatrième chapitre. L'environnement open source IfcOpenshell a été utilisé. Celui-ci permet de lire un modèle IFC, de développer des algorithmes pour analyser ce modèle et visualiser le modèle en 3D. Les modèles de navigant et du calendrier ont été développés sous Excel. Ils sont destinés à être gérés par un ou plusieurs gestionnaires, pour lesquels des macros d'exploitation et des IHM spécifiques ont été développés. Plusieurs algorithmes ont été développés pour expliciter les voisinages horizontaux et verticaux, qui ne sont qu'implicites dans un modèle IFC, à partir de raisonnements géométriques et sémantiques. Une IHM dédiée aux utilisateurs a été développée, pour leur permettre de choisir le bâtiment et le niveau de détail, d'identifier leur profil, de spécifier l'heure du départ et de choisir l'option de temps. L'itinéraire peut être visualisé graphiquement dans l'interface 3D d'OCC ou bien textuellement sous forme d'une séquence d'espaces et de transitions à parcourir pour parvenir à destination.

Le cinquième chapitre a permis d'illustrer les principales fonctionnalités de BiMov sur la base d'une exploitation du prototype. Plusieurs scénarios d'études ont été présentés, appliqués sur des différents modèles de bâtiment, pour différents profils de navigants, avec ou sans perturbation de l'état des espaces et transitions. Les résultats ont montré que :

- Au niveau Macro, BiMov offre une fonctionnalité utile pour les architectes lors d'une conception architecturale. Cette fonctionnalité permet de vérifier automatiquement l'accessibilité de tous les espaces d'un bâtiment,
- Au niveau Externe, BiMov est en mesure de trouver le plus court chemin adapté au profil de navigant et prenant en compte l'état conjoncturel des espaces et des transitions.
- Au niveau Interne, il est possible de confirmer ou pas les possibilités de navigation d'un navigant à l'intérieur d'un espace encombré, selon son propre encombrement physique.

Les scénarios du chapitre cinq ont permis d'illustrer la manière dont notre proposition de recherche détaillée au chapitre trois, compte tenu des technologies disponibles décrites dans le chapitre quatre, répond à la problématique de planification de chemin automatique dans les bâtiments complexes exprimés dans le chapitre un, dans le respect des spécifications détaillées précisées dans le chapitre deux. Ces scénarios se sont basés sur des modèles BIM de bâtiments exprimés en format IFC d'origine externe, afin de montrer la généricité de nos propositions.

Perspectives de recherche

Ce travail de recherche scientifique a suscité un développement informatique significatif, néanmoins insuffisant pour répondre à la variété de cas qu'un nombre plus important de modèles aurait forcément révélée. Pour la suite de cette thèse, certaines améliorations sont envisagées pour améliorer la performance et la robustesse de BiMov, mais aussi pour aborder de nouveaux enjeux scientifiques que les limites actuelles inspirent.

Au niveau Externe, les espaces intérieurs sont représentés par le centre de gravité de la boîte englobante de leurs frontières, qu'il s'agisse d'une pièce, d'un couloir, d'un hall d'accès. Dans certains cas que nous avons pu identifier, ce raccourci simplificateur est inadéquat, comme dans le cas d'un couloir entourant complètement une salle de réunion ou un patio (Figure 89). Pour surmonter cette difficulté, il semble nécessaire de pouvoir représenter un tel espace par un réseau de nœuds judicieusement placés devant chacune des transitions qui le desservent.

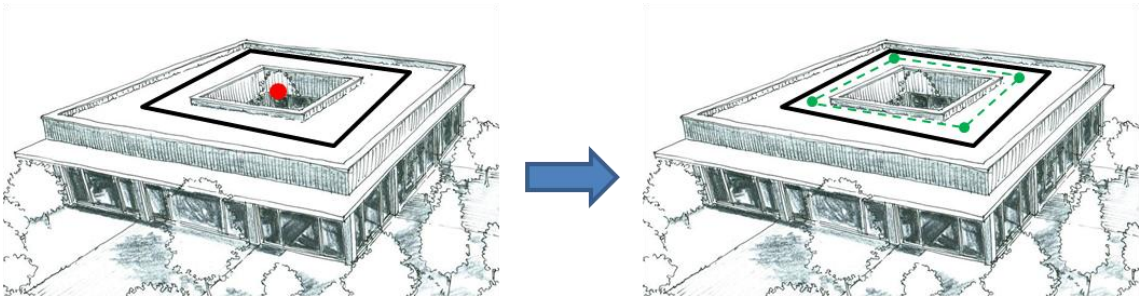


Figure 89 : Cas d'un espace entourant un patio

Au niveau Interne, il serait souhaitable d'introduire formellement le concept de point d'intérêt, permettant d'identifier des points d'intérêt (POI : Point Of Interest) à l'intérieur des espaces (Figure 90) comme un guichet, une machine à café, un défibrillateur, etc. Pour ce faire, il est nécessaire d'ajouter une nouvelle classe associée à la classe «Espace intérieur» et localisée dans l'environnement. Au niveau du modèle IFC en entrée, plusieurs possibilités se présentent pour identifier des points d'intérêt remarquables de type meuble (IfcFurnishingElement), équipement (IfcEquipementElement), ou objet non standard (IfcProxyElement) muni de propriétés spécifiques.

Figure 90 : Cas d'un grand espace intérieur avec points d'intérêt (POI)

Il nous semble également utile d'étendre la planification intérieure de chemin vers l'extérieur du bâtiment, dans le but de trouver un chemin complet pour le navigant, qui aille de l'extérieur vers l'intérieur ou le contraire, de pouvoir plus facilement se déplacer d'un bâtiment à un autre, dans un même quartier de ville (Figure 91). Cela nécessiterait de connecter nos modèles de graphes avec le réseau extérieur. Les nœuds qui correspondent aux portes d'entrées dans BiMov ont vocation à être considérés comme des nœuds de liaison avec les plus proches nœuds des réseaux extérieurs.

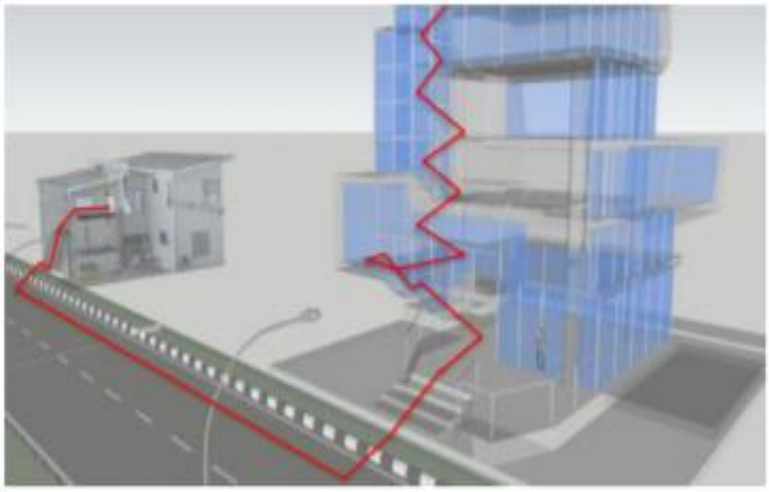


Figure 91 : Planification de chemins intérieurs via l'extérieur

A plus long terme, il est possible d'étendre le système pour qu'il couvre d'autres aspects de la vie d'un bâtiment. La proposition actuelle s'est particulièrement focalisée sur les phases de conception et d'exploitation du bâtiment, mais n'est pas du tout adaptée à la phase de construction. En effet, planifier un chemin dans un projet en cours de construction s'avère plus complexe, en raison de l'avancement des travaux (prévu/réel), de la multiplication des zones dangereuses (travaux d'excavation, grues, échafaudage, voies des livraisons, zones des stockages), de la circulation d'engins sur des chemins mal identifiés.

Liste des références

Afyouni, I., 2013. Knowledge representation and management in indoor mobile environments (phdthesis). Université de Bretagne occidentale - Brest.

Afyouni, I., Ray, C., Claramunt, C., 2012. Spatial models for context-aware indoor navigation systems: A survey. J. Spat. Inf. Sci. 2012, 85–123. https://doi.org/10.5311/JOSIS.2012.4.73

Ali, M., Liu, H., Stoll, N., Thurow, K., 2016. Kinematic Analysis of 6-DOF Arms for H20 Mobile Robots and Labware Manipulation for Transportation in Life Science Labs. https://doi.org/10.14313/JAMRIS_4-2016/30

Assises nationales de la mobilité [WWW Document], 2017. . Assises Natl. Mobilité - Plateforme Particip. URL https://www.assisesdelamobilite.gouv.fr/presentation (accessed 9.27.17).

Bandi, S., Thalmann, D., 1998. Space Discretization for Efficient Human Navigation. Comput. Graph. Forum 17, 195–206. https://doi.org/10.1111/1467-8659.00267

Barlish, K., Sullivan, K., 2012. How to measure the benefits of BIM — A case study approach. Autom. Constr. 24, 149–159. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.008

Basiri, A., Lohan, E.S., Moore, T., Winstanley, A., Peltola, P., Hill, C., Amirian, P., Figueiredo e Silva, P., 2017. Indoor location based services challenges, requirements and usability of current solutions. Comput. Sci. Rev. 24, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.002

Bazjanac, V., 2009. Implementation of semi-automat ed energy perform ance simulation: building geometry. Presented at the 26th International Conference on Managing IT in Construction (CIB W), pp. 595–602.

Beinschob, P., Meyer, M., Reinke, C., Digani, V., Secchi, C., Sabattini, L., 2017. Semi-automated map creation for fast deployment of AGV fleets in modern logistics. Robot. Auton. Syst. 87, 281–295. https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.10.018

Bellini, P., Nesi, P., Simoncini, M., Tibo, A., 2014. Maintenance and emergency management with an integrated indoor/outdoor navigation support. J. Vis. Lang. Comput., Distributed Multimedia Systems DMS2014 Part I 25, 637–649. https://doi.org/10.1016/j.jvlc.2014.10.009

Blattner, A., Vasilev, Y., Harriehausen-Mühlbauer, B., 2015. Mobile Indoor Navigation Assistance for Mobility Impaired People. Procedia Manuf., 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2015) and the Affiliated Conferences, AHFE 2015 3, 51–58. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.107

Boguslawski, P., Mahdjoubi, L., Zverovich, V., Fadli, F., 2016. Automated construction of variable density navigable networks in a 3D indoor environment for

emergency response. Autom. Constr. 72, Part 2, 115–128. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.041

Boumenir, Y., 2011. Spatial navigation in real and virtual urban environments: performance and multisensory processing of spatial information in sighted, visually impaired, late and congenitally blind individuals (phdthesis). Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.

Breux, S., Diaz, J., 2017. La ville intélligente- Origine, définitions, forces et limites d'une expression polysémique. Institut national de la recherche scientifique.

Buchel, D., Gilliéron, P.-Y., 2004. Navigation Pédestre à l'Intérieur des Bâtiments.

BuildingSmart, 2013. Building Smart, Industry Foundation Classes (IFC), http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/final/html/schema/ifcproductextension/lexical/ifcspace.htm.

Cavanaugh, A., Lowe, M., Cyganski, D., Duckworth, james, 2010. WPI Precision Personnel Location System: Rapid Deployment Antenna System and Sensor Fusion for 3D Precision Location - Semantic Scholar [WWW Document].

Chang, H.-C., 2009. High-quality path planning for autonomous mobile robots with #x03B7;3-splines and parallel genetic algorithms, in: 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Presented at the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1671–1677. https://doi.org/10.1109/ROBIO.2009.4913252

Chen, L.-C., Wu, C.-H., Shen, T.-S., Chou, C.-C., 2014. The application of geometric network models and building information models in geospatial environments for fire-fighting simulations. Comput. Environ. Urban Syst. 45, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.01.003

Chen, P.-H., Cui, L., Wan, C., Yang, Q., Ting, S.K., Tiong, R.L.K., 2005. Implementation of IFC-based web server for collaborative building design between architects and structural engineers. Autom. Constr. 14, 115–128. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.08.013

Cheng, J.C.P., Ma, L.Y.H., 2013. A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and planning. Waste Manag. 33, 1539–1551. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.001

Cheng, Yang, Young Li, 2014. Seamless outdoor/indoor navigation with WIFI/GPS aided low cost Inertial Navigation System [WWW Document]. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490714000020 (accessed 2.1.16).

Chestnutt, J., Kuffner, J., Nishiwaki, K., Kagami, S., 2003. Planning Biped Navigation Strategies in Complex Environments [WWW Document]. URL /paper/Planning-Biped-Navigation-Strategies-in-Complex-En-Chestnutt-Kuffner/4422c014ecd7a9b055959da99e985cc24b12cd8d (accessed 11.15.17).

Cheung, F.K.T., Rihan, J., Tah, J., Duce, D., Kurul, E., 2012. Early stage multi-level cost estimation for schematic BIM models. Autom. Constr. 27, 67–77. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.008

Choi, J., Kim, H., Kim, I., 2015. Open BIM-based quantity take-off system for schematic estimation of building frame in early design stage. J. Comput. Des. Eng. 2, 16–25. https://doi.org/10.1016/j.jcde.2014.11.002

Choi, Jungsik, Choi, Junho, Kim, I., 2014. Development of BIM-based evacuation regulation checking system for high-rise and complex buildings. Autom. Constr. 46, 38–49. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.12.005

Choset, H.M., 2005. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementation. MIT Press.

Clanché, F., Rascol, O., 2011. Le découpage en unités urbaines de 2010 L'espace urbain augmente de 19%en une décennie. Insee.

Code forestier Wallon [WWW Document], 2008. URL http://archive.wikiwix.com/cache/?url=http%3A%2F%2Flutgen.wallonie.be%2Fdoc%2Fcodeforestier.pdf (accessed 11.9.17).

Copot, C., Naranjo, H., Andres, J., Mac Thi, T., De Keyser, R., 2016. Collision-free path planning in indoor environment using a quadrotor, in: 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2016. Presented at the 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), pp. 351–356.

De Berg, M., Cheong, otfried, 2008. Computational Geometry - Algorithms and Applications.

Deak, G., Curran, K., Condell, J., 2012. A survey of active and passive indoor localisation systems. Comput. Commun. 35, 1939–1954. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.06.004

Diakité, A.A., Zlatanova, S., 2018. Spatial subdivision of complex indoor environments for 3D indoor navigation. Int. J. Geogr. Inf. Sci. 32, 213–235. https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1376066

Donkers, S., Ledoux, H., Zhao, J., Stoter, J., 2016. Automatic conversion of IFC datasets to geometrically and semantically correct CityGML LOD3 buildings. Trans. GIS 20, 547–569. https://doi.org/10.1111/tgis.12162

Duchoň, F., Babinec, A., Kajan, M., Beňo, P., Florek, M., Fico, T., Jurišica, L., 2014. Path Planning with Modified a Star Algorithm for a Mobile Robot. Procedia Eng., Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems 96, 59–69. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.098

Dudas, P.M., Ghafourian, M., Karimi, H.A., 2009. ONALIN: Ontology and Algorithm for Indoor Routing, in: 2009 Tenth International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware. Presented at the 2009 Tenth International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware, pp. 720–725. https://doi.org/10.1109/MDM.2009.123

Eastman, C., Lee, Jae-min, Jeong, Y., Lee, Jin-kook, 2009. Automatic rule-based checking of building designs. Autom. Constr. 18, 1011–1033. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.07.002

Eastman, Teicholz, Sacks, Kathleen Liston, 2011. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors, 2nd Edition.

El-Mekawy, M., B, A.Ö., C, I.H., 2012. An Evaluation of IFC-CityGML Unidirectional Conversion. Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl. IJACSA 3. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2012.030525

Fang, Z., Zong, X., Li, Qingquan, Li, Qiuping, Xiong, S., 2011. Hierarchical multi-objective evacuation routing in stadium using ant colony optimization approach. J. Transp. Geogr., Special Issue : Geographic Information Systems for Transportation 19, 443–451. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.10.001

Filippo, M., 2013. Automatic Extraction of Improved Geometrical Network Model from CityGML for Indoor Navigation.

Fu, B., Chen, L., Zhou, Y., Zheng, D., Wei, Z., Dai, J., Pan, H., 2018. An improved A* algorithm for the industrial robot path planning with high success rate and short length. Robot. Auton. Syst. 106, 26–37. https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.04.007

Gillieron, P.-Y., Ladetto, Q., 2002. De l'évolution du GPS à la navigation pédestre [WWW Document].

Gimenez, L., Hippolyte, J.-L., Robert, S., Suard, F., Zreik, K., 2015. Review: reconstruction of 3D building information models from 2D scanned plans. J. Build. Eng. 2, 24–35. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.04.002

Gimenez, L., Robert, S., Suard, F., Zreik, K., 2016. Automatic reconstruction of 3D building models from scanned 2D floor plans. Autom. Constr. 63, 48–56. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.008

Google Maps - MapsPeople [WWW Document], n.d. URL https://www.mapspeople.com/mapsindoors (accessed 6.2.17).

Gröger, G., Plümer, L., 2012. OGC City Geography Markup Language (CityGML) En-coding Standard. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 71, 12–33. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004

Hamieh, A., Deneux, D., Tahon, C., 2017. BiMov: BIM-Based Indoor Path Planning. Adv. Mech. Des. Eng. Manuf. 889–899. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45781-9_89

Hamieh, A., Deneux, D., Tahon, C., 2016. BIMOV: ANALAYSE AUTOMATIQUE DE NAVIGABILITE DANS LES BATIMENTS. 11e Conférence Francoph. D'Optimisation Simul.- MOSIM'16.

Hamieh, A., Deneux, D., Tahon, C., 2015. BiMov : vers une analyse dynamique de navigabilité dans les bâtiments. Presented at the Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées.

Han, C.S., Law, K.H., Latombe, J.-C., Kunz, J.C., 2002. A performance-based approach to wheelchair accessible route analysis. Adv. Eng. Inform. 16, 53–71. https://doi.org/10.1016/S1474-0346(01)00003-9

Harika Reddy, 2013. PATH FINDING - Dijkstra's and A* Algorithm's.

Hong, S., Jung, J., Kim, S., Cho, H., Lee, J., Heo, J., 2015. Semi-automated approach to indoor mapping for 3D as-built building information modeling. Comput. Environ. Urban Syst. 51, 34–46. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.01.005

Horna, S., Meneveaux, D., Damiand, G., Bertrand, Y., 2009. Consistency constraints and 3D building reconstruction. Comput.-Aided Des. 41, 13–27. https://doi.org/10.1016/j.cad.2008.11.006

Hsieh, P.C., Kim, W. j, 2010. Autonomous robotic wheelchair with collision-avoidance navigation and real-time path planning, in: 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. pp. 1396–1401. https://doi.org/10.1109/AIM.2010.5695790

IndoorGML OGC [WWW Document], n.d. URL http://indoorgml.net/ (accessed 5.9.17).

Iñigo, R.M., Alley, D., 1991. Algorithms for path planning, navigation and guidance of an AGV. Robot. Auton. Syst. 7, 309–326. https://doi.org/10.1016/0921-8890(91)90062-P

INRS-Le guide de la circulation en entreprise, 2010.

Irizarry, J., Karan, E.P., Jalaei, F., 2013. Integrating BIM and GIS to improve the visual monitoring of construction supply chain management. Autom. Constr. 31, 241–254. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.005

Isikdag, U., Zlatanova, S., Underwood, J., 2013. A BIM-Oriented Model for supporting indoor navigation requirements. Comput. Environ. Urban Syst. 41, 112–123. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.05.001

J.Woo, J.Wilsmann, D.Kang, 2010. Use of As-Built Building Information Modeling [WWW Document]. URL (accessed 1.25.17).

Kallmann, M., Bieri, H., Thalmann, D., 2003. Fully Dynamic Constrained Delaunay Triangulations. Geom. Model. Sci. Vis. G Brunnett B Hamann H Mueller Eds Springer-Verl. 2003.

Kang, H.-K., Li, K.-J., 2017. A Standard Indoor Spatial Data Model—OGC IndoorGML and Implementation Approaches. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 6, 116. https://doi.org/10.3390/ijgi6040116

Kang, S., Miranda, E., 2006. Planning and visualization for automated robotic crane erection processes in construction. Autom. Constr., The first conference on

the Future of the AEC Industry (BFC05) 15, 398–414. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.06.008

Khatib, O., 1986. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. SpringerLink 396–404. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8997-2_29

Klepeis, N., Nelson, W., Ott, W., Robinson, J., Tsang, A., Switzer, P., Behar, J., Hern, S., Engelmann, W., 2001. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants. J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol. 11, 231–252.

Koch, C., Neges, M., König, M., Abramovici, M., 2014. Natural markers for augmented reality-based indoor navigation and facility maintenance. Autom. Constr. 48, 18–30. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.08.009

Krause, A., 1995. The Focussed D* Algorithm for Real-Time Replanning. Robot. Inst. Carnegie Mellon Univ.

Kuffner, J.J., 1998. Goal-Directed Navigation for Animated Characters Using Real-Time Path Planning and Control, in: Modelling and Motion Capture Techniques for Virtual Environments, Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 171–186. https://doi.org/10.1007/3-540-49384-0_14

Kul, G., Özyer, T., Tavli, B., 2014. WLAN based Real Time Indoor Positioning: Literature Survey and Experimental Investigations. Procedia Comput. Sci., The 9th International Conference on Future Networks and Communications (FNC'14) 34, 157–164. https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.07.078

Kumar Guruji, A., Agarwal, H., Parsediya, D., 2016. Time-efficient A* Algorithm for Robot Path Planning. Procedia Technol. 23, 144–149. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.010

Laakso, M., Kiviniemi, A., 2012. The IFC standard - a review of history, development, and standardization.

Latombe, J.-C., Lazanas, A., Shekhar, S., 1991. Robot motion planning with uncertainty in control and sensing. Artif. Intell. 52, 1–47. https://doi.org/10.1016/0004-3702(91)90023-D

LaValle, S.M., 2006. Planning Algorithms [WWW Document]. Camb. Core. https://doi.org/10.1017/CBO9780511546877

Lee, J.-K., Eastman, C.M., Lee, J., Kannala, M., Jeong, Y.-S., 2010. Computing Walking Distances within Buildings Using the Universal Circulation Network. Environ. Plan. B Plan. Des. 37, 628–645. https://doi.org/10.1068/b35124

Lewis, R., Séquin, C., 1998. Generation of 3D building models from 2D architectural plans. Comput.-Aided Des. 30, 765–779. https://doi.org/10.1016/S0010-4485(98)00031-1

Li, N., Becerik-Gerber, B., Krishnamachari, B., Soibelman, L., 2014. A BIM centered indoor localization algorithm to support building fire emergency response operations. Autom. Constr. 42, 78–89. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.019

Li, T.-Y., Huang, P.-Z., 2004. Planning humanoid motions with striding ability in a virtual environment, in: 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. pp. 3195-3200 Vol.4. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1308746

Liebich, thomas, 2010. Unveiling IFC 2x4- the next generation of open BIM.

Lin, Y.-H., Liu, Y.-S., Gao, G., Han, X.-G., Lai, C.-Y., Gu, M., 2013. The IFC-based path planning for 3D indoor spaces. Adv. Eng. Inform. 27, 189–205. https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.10.001

Liu, L., 2017. Indoor Semantic Modelling for Routing The Two-Level Routing Approach for Indoor Navigation. Delft University of Technology.

Liu, L., Zlatanova, S., 2015. An Approach for Indoor Path Computation among Obstacles that Considers User Dimension. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 4 4 2015. https://doi.org/10.3390/ijgi4042821

Liu, L., Zlatanova, S., 2013. Generating navigation models from existing building data. Acquis. Model. Indoor Enclosed Environ. 2013 Cape Town South Afr. 11-13 Dec. 2013 ISPRS Arch. Vol. XL-4W4 2013.

Lopez, T., 2012. Planification de Chemin et adaptation de posture en environnement dynamique (phdthesis). INSA de Rennes.

Ma, L., Sacks, R., Zeibak-Shini, R., 2015. Information modeling of earthquake-damaged reinforced concrete structures. Adv. Eng. Inform. 29, 396–407. https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.01.007

Ma Ling, Sacks Rafael, Zeibak-Shini Reem, Aryal Ashrant, Filin Sagi, 2016. Preparation of Synthetic As-Damaged Models for Post-Earthquake BIM Reconstruction Research. J. Comput. Civ. Eng. 30, 04015032. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000500

Ma, Z., Wei, Z., Zhang, X., 2013. Semi-automatic and specification-compliant cost estimation for tendering of building projects based on IFC data of design model. Autom. Constr. 30, 126–135. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.020

Mapwize - La solution pour guider les visiteurs à l'intérieur des bâtiments [WWW Document], n.d. URL https://www.mapwize.io/fr/ (accessed 10.3.17).

McGraw Hill, 2014. Valeur ajoutée du BIM pour la construction dans les grands marchés mondiaux.

Mioc, D., Anton, F., Liang, G., 2008. On-line Street Network Analysis for Flood Evacuation Planning, in: Remote Sensing and GIS Technologies for Monitoring and Prediction of Disasters, Environmental Science and Engineering.

Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 219–242. https://doi.org/10.1007/978-3-540-79259-8_13

Monteiro, A., Poças Martins, J., 2013. A survey on modeling guidelines for quantity takeoff-oriented BIM-based design. Autom. Constr. 35, 238–253. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.005

Montoya, A., Vandeportaele, B., Lacroix, S., Hattenberger, G., 2010. Flight autonomy of micro-drone in indoor environments using LiDAR flash camera. Presented at the IMAV 2010, International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition, p. pp xxxx.

Nilsson, N.J., 1969. A Mobile Automaton: An Application of Artificial Intelligence Techniques. SRI international menlo park ca artificial intelligence centre.

Noreen, I., Khan, A., Habib, Z., 2016. Optimal Path Planning using RRT* based Approaches: A Survey and Future Directions. Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl. Ijacsa 7. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2016.071114

ONU, 2014. Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes – ONU | ONU DAES | Nations Unies Département des affaires économiques et sociales.

Paden, B., Cap, M., Yong, S.Z., Yershov, D., Frazzoli, E., 2016. A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-driving Urban Vehicles. ArXiv160407446 Cs.

Pruski, A., 2010. A unified approach to accessibility for a person in a wheelchair. Robot. Auton. Syst. 58, 1177–1184. https://doi.org/10.1016/j.robot.2010.07.001

Pu, S., Zlatanova, S., 2005. Evacuation Route Calculation of Inner Buildings, in: Geo-Information for Disaster Management. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1143–1161. https://doi.org/10.1007/3-540-27468-5_79

Roberts, T., 2016. We Spend 90% of Our Time Indoors. Says Who? [WWW Document]. BuildingGreen. URL https://www.buildinggreen.com/blog/we-spend-90-our-time-indoors-says-who (accessed 10.6.17).

Rodriguez-Sanchez, M.C., Martinez-Romo, J., 2017. GAWA – Manager for accessibility Wayfinding apps. Int. J. Inf. Manag. 37, 505–519. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.05.011

Rosen, D.A., Mammano, F.J., Favout, R., 1970. An electronic route-guidance system for highway vehicles. IEEE Trans. Veh. Technol. 19, 143–152. https://doi.org/10.1109/T-VT.1970.23442

Rufli, M., Ferguson, dave, siegwart, R., 2009. Smooth Path Planning in Constrained Environments. 2009 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.

Russo, D., 2013. Route Directions using Visible Landmarks for an Indoor Navigation System based on Android device: "IndoorNav."

Rusu, A., 2014. Planification de chemin et navigation autonome pour un rover d'exploration planétaire. Toulouse, ISAE.

Ryoo, H.-G., Kim, T., Li, K.-J., 2015. Comparison Between Two OGC Standards for Indoor Space: CityGML and IndoorGML, in: Proceedings of the Seventh ACM SIGSPATIAL International Workshop on Indoor Spatial Awareness, ISA '15. ACM, New York, NY, USA, pp. 1:1–1:8. https://doi.org/10.1145/2834812.2834813

Sahli, N., 2006. La géosimulation orientée agent : un support pour la planification dans le monde réel. Université Laval.

Sallez, Y., Pan, S., Montreuil, B., Berger, T., Ballot, E., 2016. On the activeness of intelligent Physical Internet containers. Comput. Ind., Emerging ICT concepts for smart, safe and sustainable industrial systems 81, 96–104. https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.12.006

Schwartz, J.T., Sharir, M., 1983. On the Piano Movers' Problem: III. Coordinating the Motion of Several Independent Bodies: The Special Case of Circular Bodies Moving Amidst Polygonal Barriers. Int. J. Robot. Res. 2, 46–75. https://doi.org/10.1177/027836498300200304

Shiller, Z., 2015. Off-Line and On-Line Trajectory Planning. SpringerLink 29–62. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14705-5_2

Shiller, Z., Yamane, K., Nakamura, Y., 2001. Planning motion patterns of human figures using a multi-layered grid and the dynamics filter, in: Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164). Presented at the Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164), pp. 1–8 vol.1. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2001.932521

Solihin, W., Eastman, C., 2015. Classification of rules for automated BIM rule checking development. Autom. Constr. 53, 69–82. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.003

Soltani, A.R., Fernando, T., 2004. A fuzzy based multi-objective path planning of construction sites. Autom. Constr. 13, 717–734. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.04.012

Soltani, A.R., Tawfik, H., Goulermas, J.Y., Fernando, T., 2002. Path planning in construction sites: performance evaluation of the Dijkstra, A∗, and GA search algorithms. Adv. Eng. Inform. 16, 291–303. https://doi.org/10.1016/S1474-0346(03)00018-1

Steve, K.J., Benjamin, M., 2017. Path to an Integrated Modelling between IFC and CityGML for Neighborhood Scale Modelling.

Stoffel, E.-P., 2009. Hierarchical Graphs as Organisational Principle and Spatial Model Applied to Pedestrian Indoor Navigation (Text.PhDThesis). Ludwig-Maximilians-Universität München.

Sun, J., Liu, Y.-S., Gao, G., Han, X.-G., 2015. IFCCompressor: A content-based compression algorithm for optimizing Industry Foundation Classes files. Autom. Constr. 50, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.10.015

Taneja, S., Akinci, B., Garrett Jr., J.H., Soibelman, L., 2016. Algorithms for automated generation of navigation models from building information models to support indoor map-matching. Autom. Constr. 61, 24–41. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.09.010

Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., Lytle, A., 2010. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. Autom. Constr. 19, 829–843. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007

Tashakkori, H., Rajabifard, A., Kalantari, M., 2015. A new 3D indoor/outdoor spatial model for indoor emergency response facilitation. Build. Environ. 89, 170–182. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.036

Teo, T.-A., Cho, K.-H., 2016. BIM-oriented indoor network model for indoor and outdoor combined route planning. Adv. Eng. Inform. 30, 268–282. https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.04.007

Tomkewitsch, R. von, 1991. Dynamic route guidance and interactive transport management with ALI-SCOUT. IEEE Trans. Veh. Technol. 40, 45–50. https://doi.org/10.1109/25.69971

Totani, S., 1980. Development and current status of CACS (comprehensive automobile traffic control system), in: 30th IEEE Vehicular Technology Conference. Presented at the 30th IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 336–341. https://doi.org/10.1109/VTC.1980.1622831

Tsirmpas, Rompas, fokou, 2015. An indoor navigation system for visually impaired and elderly people based on Radio Frequency Identification (RFID) [WWW Document]. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025514008007 (accessed 2.1.16).

Union, P.O. of the E., 2012. Overview of Intelligent Transport Systems (ITS) developments in and across transport modes. [WWW Document]. URL https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b66215fb-ea9b-11e5-a2a7-01aa75ed71a1/language-en (accessed 6.7.18).

Unity - Manual: Navigation System in Unity [WWW Document], n.d. URL https://docs.unity3d.com/Manual/nav-NavigationSystem.html (accessed 9.7.17).

Vanlande, R., Nicolle, C., Cruz, C., 2008. IFC and building lifecycle management. Autom. Constr. 18, 70–78. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.05.001

Venugopal, M., Eastman, C.M., Sacks, R., Teizer, J., 2012. Semantics of model views for information exchanges using the industry foundation class schema.

Adv. Eng. Inform., Knowledge based engineering to support complex product design 26, 411–428. https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.01.005

Wang, C., Cho, Y.K., Kim, C., 2015. Automatic BIM component extraction from point clouds of existing buildings for sustainability applications. Autom. Constr. 56, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.001

Wang, J., Zhang, S., Teizer, J., 2015. Geotechnical and safety protective equipment planning using range point cloud data and rule checking in building information modeling. Autom. Constr. 49, 250–261. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.09.002

Wang, Z., Cai, J., 2018. The path-planning in radioactive environment of nuclear facilities using an improved particle swarm optimization algorithm. Nucl. Eng. Des. 326, 79–86. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.11.006

Wang, Z., Zlatanova, S., 2016. Multi-agent based path planning for first responders among moving obstacles. Comput. Environ. Urban Syst. 56, 48–58. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.11.001

Xiong, Q., Zhu, Q., Du, Z., Zlatanova, S., Zhang, Y., Zhou, Y., Li, Y., 2017. Free multi-floor indoor space extraction from complex 3D building models. Earth Sci. Inform. 10, 69–83. https://doi.org/10.1007/s12145-016-0279-x

Yan, W., Culp, C., Graf, R., 2011. Integrating BIM and gaming for real-time interactive architectural visualization. Autom. Constr. 20, 446–458. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.013

Yuan, W., Schneider, M., 2011. 3D Indoor Route Planning for Arbitrary-Shape Objects, in: Database Systems for Adanced Applications, Lecture Notes in Computer Science. Presented at the International Conference on Database Systems for Advanced Applications, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 120–131. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20244-5_12

Zhang, S., Boukamp, F., Teizer, J., 2015. Ontology-based semantic modeling of construction safety knowledge: Towards automated safety planning for job hazard analysis (JHA). Autom. Constr. 52, 29–41. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.02.005

Zhang, S., Teizer, J., Lee, J.-K., Eastman, C.M., Venugopal, M., 2013. Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules. Autom. Constr. 29, 183–195. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.006

Zlatanova, S., Suhana, S., Baharin, K., 2008. Optimal navigation of first responders using DBMS.

Zuppa, D., Raja, I., Suermann, P., 2009. BIM's Impact on the Success Measures of Construction Projects [WWW Document]. URL file:///C:/Users/Ahmed/Downloads/Ahmed.pdf (accessed 1.24.17).