

Développement d'une modélisation spatiotemporelle et
d'artéfacts pour l'évaluation dynamique du taux d'occupation
pour la planification des projets de construction de bâtiments

par

Stéphane MORIN PÉPIN

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

MONTREAL, LE 10 DÉCEMBRE 2024

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Stéphane Morin Pépin, 2024



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

Monsieur Adel Francis, Directeur de thèse
Département de génie de la construction à l'École de Technologie Supérieure

Monsieur Michael McGuffin, Président du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de Technologie Supérieure

Monsieur Edmond Miresco, Membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de Technologie Supérieure

Madame Ivanka Iordanova, Membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de Technologie Supérieure

Monsieur Michel Guevremont, Examineur externe
Ingénieur Lead Sénior - Planification et simulation 4D chez Hydro Québec

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 29 NOVEMBRE 2024

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Comme tout projet de construction, ce projet de recherche n'aurait pas été possible sans le soutien et la collaboration de nombreux collaborateurs, qui ont été essentiels au succès de ce projet de recherche. J'aimerais premièrement remercier mon directeur de recherche, le Professeur Adel Francis, qui m'a guidé, conseillé et partagé son expertise. J'aimerais également soulever notre vision commune concernant les recherches dans la gestion et la planification d'un projet de construction, qui a été un facteur clé dans la motivation à poursuivre cette recherche. Je remercie également un collaborateur de longue date, monsieur Luc Martin. Ses connaissances et ses contacts dans la construction m'ont permis d'obtenir l'information et d'accéder aux chantiers qui ont servi de références tout au long de cette recherche. J'aimerais également souligner le soutien financier de Pomerleau, de Construction Bâtiment Québec et de MITACS, ainsi que tous les professionnels avec lesquels j'ai eu l'occasion de collaborer, sans qui cette recherche n'aurait pas été possible. Et finalement, l'appui de ma famille.

Développement d'une modélisation spatiotemporelle et d'artéfacts pour l'évaluation dynamique du taux d'occupation pour la planification des projets de construction de bâtiments

Stéphane MORIN PÉPIN

RÉSUMÉ

Les échéanciers présentés sous forme de diagramme de Gantt-Précédence, et reposant sur la méthode du chemin critique, ne répondent plus adéquatement aux exigences de l'industrie de la construction de bâtiments. En effet, cette approche centrée principalement sur les durées des activités échoue à gérer efficacement les opérations sur les chantiers, la rotation des équipes, l'approvisionnement et la circulation des matériaux, ainsi que la gestion des espaces pour éviter l'encombrement ou la relaxation du site.

S'adressant principalement aux gestionnaires de projets de la construction, l'objectif de ce projet de recherche est d'améliorer la planification des projets de construction en développant une méthodologie de modélisation et de calcul du taux d'occupation spatiotemporel dynamique. La méthodologie proposée est basée sur les techniques du *Space Planning*, notamment la Modélisation Chronographique pour concevoir des artéfacts et des modélisations, en se basant sur les techniques du design science, permettant de déterminer et d'optimiser les Taux d'occupation spatiotemporelle dynamique des sites de construction.

Des relevés concernant la position et l'occupation des différentes composantes des opérations, à savoir les équipes, les équipements, les outils, les matériaux et les installations temporaires, ont été effectués sur divers chantiers de construction tout en explorant les technologies disponibles pour ce faire. L'analyse de ces relevés a permis d'identifier l'ensemble des propriétés des secteurs et des Type d'Occupations (TO) nécessaires pour la modélisation et les calculs. Par la suite, la structure de découpage dynamique des secteurs (SDDS) a été proposée afin d'identifier et de gérer les secteurs disponibles lors des travaux. Cela a conduit au développement d'une méthodologie pour calculer le taux d'occupation statique d'un secteur, basée sur la création d'artéfacts statiques pour représenter l'occupation et le calcul de ce taux dans les différents secteurs.

La Planification par modélisation dynamique du taux d'occupation (PMDTO) est ensuite conçu pour permettre le calcul et la modélisation dynamique du taux d'occupation. Cette modélisation est effectuée par l'ajout de mini artéfacts à la Modélisation Chronographique, permettant l'optimisation du site de construction et offrant une modélisation plus réaliste des travaux. Un processus de validation a été réalisé en utilisant un exemple de projet, un atelier, ainsi qu'un questionnaire adressé à des professionnels du secteur de la construction pour recueillir leurs avis sur la représentativité des artéfacts.

Mots-clés: Construction, Gestion, Planification, Space Planning, Occupation de l'espace

Development of a Methodology for Modelling and Calculating the Dynamic Spatiotemporal Occupancy Rate for the Planning of Construction Projects

Stéphane MORIN PÉPIN

ABSTRACT

The schedules presented by the Gantt-Precedence diagrams, based on the Critical Path Method (CPM), no longer adequately meet the demands of the building construction industry. This approach, which focuses mainly on the duration of activities, fails to manage job site operations effectively, including team rotation, material supply and circulation, and space management to avoid site congestion or relaxation. Aimed primarily at construction project managers, the objective of this research project is to improve construction project scheduling by developing a methodology for modelling and calculating the dynamic space-time occupancy rate. The proposed methodology is based on Space Planning techniques, specifically Chronographic Modelling to design artefacts and models, utilizing design science to determine and optimize the Dynamic Space-Time Occupancy Rates of construction sites.

Surveys assessing the position and occupancy of various operational components, such as teams, equipments, tools, materials, and temporary installations, were conducted on several construction sites while exploring available technologies for this purpose. The analysis of these surveys led to the identification of all the properties of the sectors and Operation Type (OT) necessary for modelling and calculations. Subsequently, the Dynamic Location Breakdown Structure (DLBS) was proposed to identify and manage the available sectors during the works. This led to the development of a methodology to calculate the static occupancy rate of a sector, based on the creation of static artefacts to represent the occupation and calculating this rate in different sectors.

The Dynamic Modeling of the Occupancy Rate Scheduling (DMORS) is then designed to allow the calculation and dynamic modelling of the occupancy rate. This modelling is performed by adding mini artefacts to Chronographic Modelling, allowing for site optimization and offering a more realistic representation of the work. A validation process was undertaken using a sample project, a workshop, and a questionnaire addressed to professionals in the construction sector to gather their opinions on the representativeness of the artefacts.

Keywords: Construction Management, Planning, Space-Planning, Space Occupation

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	7
1.1 Historique des méthodes de planifications de projet de construction	8
1.1.1 La planification à l'échelle du temps	10
1.1.1.1 Les diagrammes à bandes	10
1.1.1.2 Les diagrammes linéaires (<i>Line of Balance</i>)	11
1.2 Méthodes de planifications spécifiques à la construction	12
1.2.1 Les origines du Space Planning	12
1.2.2 Les modèles mathématiques	18
1.2.2.1 Aménagement extérieur	20
1.2.2.2 Aménagement intérieur	23
1.2.3 Les modélisations	25
1.2.3.1 Le SightPlan	25
1.2.3.2 Le <i>Location Based Management System</i> (LBMS)	26
1.2.3.3 Le Takt-Time Planning (TTP)	27
1.2.3.4 La Modélisation Chronographique	29
1.3 4D et visualisation l'échelle du temps	34
1.4 Gestion des flux	40
1.4.1 Les flux de matériaux	40
1.4.2 Les flux d'équipes de travail	43
1.4.3 Les flux spatiotemporels	44
1.5 Détection des congestions et des conflits	45
CHAPITRE 2 OBJECTIFS, MÉTHODOLOGIES ET JUSTIFICATIONS	51
2.1 Objectif	51
2.2 Méthodologie	51
2.3 Résumé des chapitres	53
2.4 Validation et résultats	55
CHAPITRE 3 ABILITY OF TECHNOLOGIES TO COLLECT THE POSITIONING AND OCCUPANCY OF WORK CREWS AND RESOURCES ON CONSTRUCTION JOB SITES	59
3.1 Abstract	59
3.2 Introduction	60
3.3 Background and Justification	61
3.4 Goal, Objectives and Limitations	62
3.4.1 Research Goal and Objectives	62
3.4.2 Research Methodology	63
3.4.3 Research Constraint and Limits	63

3.5	Traditional Methods	64
3.5.1	Manual Takeoff	64
3.5.2	Pictures and Videos	64
3.6	3D Reconstruction	66
3.6.1	Photogrammetry and RGB images	68
3.6.2	Stereo Camera	69
3.6.3	Time-of-Flight (ToF) Cameras, Depth Cameras, and RGB-D Images	69
3.7	3D Scan	72
3.7.1	Laser Scanner	72
3.7.2	Light Detection and Ranging	73
3.8	Position Sensors	74
3.8.1	Global Positioning System	75
3.8.2	Ultra-Wideband	75
3.8.3	Radio Frequency Identification	76
3.9	Capability	77
3.9.1	Collect Speed	78
3.9.2	Equipment Portability	79
3.9.3	Quality and Precision	79
3.9.4	Worksite Impact	80
3.9.5	Treatment Time	80
3.9.6	Information Access	81
3.9.7	Maturity	81
3.10	Validation, Technology Selection	83
3.11	Conclusion and Discussion	84
3.12	Future Research	85
CHAPITRE 4	MODELING AND CATEGORIZING STANDARDIZED ARTEFACTS FOR SCHEDULING OCCUPANCY ON BUILDING CONSTRUCTION SITES	87
4.1	Abstract	87
4.2	Introduction	88
4.3	Background and justification	89
4.4	Goal, objectives and limitations	91
4.4.1	Needs and justification	91
4.4.2	Research goal and objectives	92
4.4.3	Research Methodology	93
4.4.4	Research constraint and limits	93
4.5	Information gathering and static analysis of the construction operations and their space requirements	93
4.5.1	Qualitative analysis	95
4.5.2	Quantitative analysis	95
4.6	Parameters for the Occupation Rate (OR) calculation : Definition and parameters	96

4.6.1	Occupation Type (OT)	97
4.6.1.1	General occupation	98
4.6.1.2	Storage	98
4.6.1.3	Operations	99
4.6.1.4	Permanent occupation	100
4.6.2	OT parameters	100
4.7	Modelling of static artifacts and calculation to graphically represent the types of occupancy and operation	100
4.7.1	Simplified method	101
4.7.2	Detailed method	102
4.7.3	Exterior work, excavation, and superstructure	102
4.7.4	Exterior work, building facade	103
4.7.5	Linear work on the floor or ceiling	104
4.7.6	Interior work, maximum area, and perimeter	105
4.7.7	Interior work, part of the area or perimeter	106
4.7.8	Interior work, use of the dimensions of the OT	106
4.8	Validation of the created artifacts and graphical protocol through workshops	107
4.9	Conclusion	111
CHAPITRE 5 PLANNING THE EVOLUTION OF THE SECTORS OF A CONSTRUCTION PROJECT OVER TIME WITH THE DYNAMIC LOCATION BREAKDOWN STRUCTURE		
5.1	Abstract	113
5.2	Introduction	114
5.3	Research objectives	115
5.4	Dynamic Location Breakdown Structure (DLBS)	115
5.4.1	Layers	116
5.4.2	Dividing a layer into sectors	117
5.5	Sectors Parameters	118
5.5.1	Accessibility	119
5.5.2	Area management	119
5.6	Conclusion	120
CHAPITRE 6 A DYNAMIC SPATIOTEMPORAL SCHEDULING FOR CONSTRUCTION BUILDING PROJECT		
6.1	Abstract	121
6.2	Background and Justification	122
6.3	Objectives and limitations	128
6.3.1	Research Goal and Objectives	128
6.3.2	Constrains and limits	128
6.4	Research methodology	129
6.4.1	Data collection on real construction projects	129
6.4.2	Static artifacts creation	129
6.4.3	Static artifacts validation	129

6.4.4	Modelling and calculation of static OR and mini artefacts	130
6.4.5	Creation of the Dynamic Model of the Occupancy Rate Schedule (DMORS)	131
6.4.6	Validation of the created artefacts, graphical protocol, and calculation methods through workshops	131
6.4.7	Validation on real construction projects	131
6.5	Modeling and calculation of static occupancy rates (OR) and mini artefacts	131
6.5.1	Inclusivity of an OT	132
6.5.2	Static occupation	133
6.5.3	Occupancy Rate for a Part of the Site	134
6.5.3.1	Weight of the Sector	135
6.5.3.2	Importance factor	136
6.5.3.3	Adjusted Sector Weight	136
6.5.3.4	OR for a level, for each period	137
6.5.4	Mini artefact for dynamic representation	138
6.6	Creation of the DMORS and validation	139
6.6.1	Project duration and periods	140
6.6.2	Sectors for each level	140
6.6.3	OT	141
6.6.4	OR	142
6.6.5	DMORS creation	143
6.6.6	Optimization	144
6.7	Discussion	144
6.8	Conclusions	147
CHAPITRE 7 DISCUSSION DES RÉSULTATS		149
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		151
BIBLIOGRAPHIE		173

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Principe de gestion des matériaux sur un chantier, extrait de (Thomas, Riley & Messner, 2005) 41
Tableau 3.1	Performances of the technologies 82
Tableau 3.2	Example of prioritization of takeoff technology evaluation criteria by a small vs. a large contractor 83
Tableau 6.1	Comparison of planning methods 127
Tableau 6.2	Weight of sectors for a part of a building 137

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Exemple CPM	9
Figure 1.2 Exemple PDM	10
Figure 1.3 Exemple Gantt	11
Figure 1.4 Exemple TILOS	12
Figure 1.5 Evolution espace de travail	15
Figure 1.6 Décomposition des espaces	16
Figure 1.7 Déplacement des équipes	17
Figure 1.8 Variables pour aménagement des chantiers	21
Figure 1.9 Représentation spatiotemporelle des conflits et des activités	24
Figure 1.10 Exemple de LBMS	28
Figure 1.11 Exemple de Takt	29
Figure 1.12 Protocoles graphiques	30
Figure 1.13 Contraintes internes	31
Figure 1.14 Chrono-Task	32
Figure 1.15 Planification répétitive par secteurs	32
Figure 1.16 Regroupement par équipe	33
Figure 1.17 Optimisation spatiotemporelle	34
Figure 1.18 Cartographie standardisée	35
Figure 1.19 Structure du 4D-GCPSU	37
Figure 1.20 Formalisation des conflits spatiotemporels	46
Figure 1.21 Résolution des conflits d'espace	47
Figure 1.22 Type de conflits	48

Figure 2.1	Structure recherche et documents	57
Figure 3.1	Spherical distortion	65
Figure 3.2	Blurry image	66
Figure 3.3	TOF Precision	71
Figure 3.4	Common Problems	72
Figure 3.5	3D BIM model vs Laser scan	73
Figure 3.6	RFID Localisation	78
Figure 4.1	Takeoff	95
Figure 4.2	Sec Parameters	97
Figure 4.3	OT Parameters	98
Figure 4.4	Operations Parameters	99
Figure 4.5	Static OT Properties	101
Figure 4.6	Legend	102
Figure 4.7	Artifact : Exterior work	103
Figure 4.8	Artifact : HVAC work	104
Figure 4.9	Artifact : Work on floor	105
Figure 4.10	Artifact : Work on walls	105
Figure 4.11	Artifact : Dimensions	107
Figure 4.12	Workshop : years experience	109
Figure 4.13	Workshop : educational level	109
Figure 4.14	Partial workshop results	111
Figure 5.1	structure of DLBS	116
Figure 5.2	Layer succession	117
Figure 5.3	sectors divisions	118

Figure 5.4	Sector parameters	119
Figure 6.1	Research Methodology	130
Figure 6.2	Properties of static occupations	132
Figure 6.3	Area containing several OT	134
Figure 6.4	Example project	135
Figure 6.5	DMORS mini artefact	138
Figure 6.6	DMORS upper part	139
Figure 6.7	Mini artefacts background	139
Figure 6.8	DMORS conceptual framework	140
Figure 6.9	OR calculations and optimization	141
Figure 6.10	OTs for the case study	143
Figure 6.11	Chronographic Modeling Schedule	144
Figure 6.12	Site-spatial-temporal modeling	145
Figure 6.13	DMORS using adjusted weight	145

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

4D-LOD	4D Level of Details
ADM	Arrow Diagram Method
AI	Artificial Intelligence
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer Assisted Design
CCS	Cadre conceptuel statique
CDTO	Calcul dynamique du taux d'occupation
CPM	Critical Path Method
CSA	Critical Space-Time Analysis
CSV	Comma Separated Values
DLBS	Dynamic Location Breakdown Structure
DMORS	Dynamic Modeling of the Occupancy Rate Scheduling
ÉTS	École de technologie supérieure
GPS	Global Positioning System
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IA	Intelligence artificielle
IBS	Information Breakdown Structure
IoT	Internet of things
LBMS	Location Based Management System
LBS	Location Breakdown Structure
LiDAR	Light Detection and Ranging
LOB	Line of Balance
LOD	Level of Details
LPS	Last Planner System
MEP	Mécanique du bâtiment

OBS	Organization Breakdown Structure
OR	Occupation Rate
OT	Occupation Type
OTBS	Occupation Type Breakdown Structure
PBS	Product Breakdown Structure
PDM	Precedence Diagram Method
PIB	Produit Intérieur Brut
PMDTO	Planification par modélisation dynamique du taux d’occupation
QRT	Question réponse technique
RFiD	Radio Fequency Identification
RGB	Red, Green, Blue
RGB-D	Red, Green, Blue and Distance
SBS	Service Breakdown Structure
SCF	Space Capacity Factor
SDS	Structure de découpage des secteur
SDDS	Structure de découpage dynamique des secteurs
SIG	Systèmes d’informations géographiques
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
TO	Type d’occupation
TOF	Time Of flight
TTP	Takt-Time Planning
UWB	Ultra Wideband
WBS	Work Breakdown Structure

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$I f_s$	Sector Importance Factor
L_b	Length of the Building
L_p	Length of the Sector
L_{sec}	Safety Length to be Added to the OT
L_{ot}	Length of the OT
m	Mètre
m^2	Mètre carré
pi	Pied
pi^2	Pied Carré
S_m	Maximum Area Available in a Sector
S_{ot}	Area the OT Occupies
S_{os}	Area Occupied in a Sector
W_b	Width of the Building Under Construction
W_{ot}	Width of the OT
W_p	Width of the Sector
W_{s_s}	Weight of the Sector
$W_{s_{as}}$	Adjusted Sector Weight
W_{sec}	Safety Width to be Added to the OT
$\%_{os}$	Percentage Occupied in a Sector
$\%_{ot}$	Percentage of space occupied by an OT
$\%_{part}$	Occupancy Rate of a Part of the Site
$\%_{parta}$	Adjusted Occupancy Rate of a Part of the Site

INTRODUCTION

L'industrie de la construction joue un rôle important dans l'économie mondiale. Cette importance se manifeste à travers plusieurs aspects clés. En premier lieu, elle fournit une infrastructure cruciale à tout développement économique en représentant une part significative du produit intérieur brut (PIB). Les investissements en infrastructures publiques (routes, ponts, écoles, hôpitaux) et privées (bureaux, centres commerciaux, résidentiels) sont des moteurs de croissance économique qui influencent directement et indirectement de nombreux autres secteurs. Elle agit aussi comme multiplicateur qui stimule d'autres secteurs économiques tels que la fabrication de matériaux, la distribution, les services financiers, et les services connexes.

Cependant, en raison de sa nature unique et complexe, la construction a toujours fait face à des problèmes qui lui sont propres au niveau de la productivité, des coûts, de la qualité et de la planification, pour ne nommer que ceux-ci. Dans une étude pour modéliser les facteurs influençant la productivité, Thomas & Yiakoumis (1987) mentionnent des rapports sur le sujet remontant jusqu'en 1944, et déjà Tucker (1986) souligne que la production de masse et les progrès technologiques dans l'approvisionnement en matériaux se sont combinés à l'augmentation des taux de salaire, de sorte que la main-d'œuvre est maintenant la ressource la plus chère et la plus volatile affectant le succès d'un projet. Il mentionne également que ce n'est pas l'augmentation des taux de salaire qui ont augmenté de manière disproportionnée les coûts du projet, c'est l'échec à améliorer la productivité pour correspondre à l'augmentation de ces taux qui a entraîné des problèmes. Ainsi, Hasan, Baroudi, Elmualim & Rameezdeen (2018) mentionnent que les facteurs influençant la productivité au Canada sont : la qualité et la disponibilité des plans et devis, les travaux en temps supplémentaire, la supervision des chantiers, le travail d'équipe, l'ordonnancement des travaux, la gestion des matériaux et la gestion des demandes de changement, rendant le respect des délais difficile. Sanni-Anibire, Mohamad Zin & Olatunji (2022) ont identifié 36 causes potentielles pour le retard des chantiers, où huit (8) de ces facteurs sont liés aux techniques de planification et au contrôle du projet. Ils soulèvent par la même

occasion que ces facteurs sont trop nombreux et dépendent trop de la situation locale pour identifier une ou des causes spécifiques. Mais parmi les facteurs le plus mentionnés, on retrouve, l'effet des demandes de changements (Thomas & Napolitan, 1995; Moselhi, Leonard & Fazio, 1991; Moselhi, Assem & El-Rayes, 2005) et la congestion des chantiers de construction (Misron, Khoiry & Hamzah, 2018). Tout cela a donc pour effet d'engendrer des dépassements de coûts. Ainsi, Rosenfeld (2014) a identifié 15 causes universelles de dépassements de coûts.

Cela a donc mené à des décennies de recherches afin d'analyser, de catégoriser, de quantifier et de solutionner ces problèmes. Une des contributions les plus significatives étant l'intégration graduelle du BIM et des modélisations 3D, qui ont pour objectif de favoriser la collaboration entre les différents intervenants tout au long du projet de construction (Forgues & Becerik-Gerber, 2013; Fulford & Standing, 2014). Cela a également mené à l'utilisation d'une panoplie de modèles mathématiques et à la multiplication des systèmes de gestions documentaires.

Il reste qu'une bonne planification est essentielle au bon déroulement d'un chantier et au respect des dates importantes. Principalement, les échéanciers sont effectués sous forme d'un diagramme de Gantt, qui utilise la logique du chemin critique avec la méthode de la Précédence, comme le seul et unique modèle de planification et d'optimisation des travaux. Ainsi, durant plusieurs décennies, les recherches se sont concentrées sur l'optimisation des projets en se basant uniquement sur les méthodes du chemin critique. Malgré la qualité scientifique de ces recherches, leurs applications pratiques sont restées restreintes. Cette logique forçait les entrepreneurs à concentrer leurs efforts sur la réduction de la durée des activités au détriment d'autres critères tels que la logique de construction, la circulation et la rotation des opérations, l'approvisionnement des matériaux et la disponibilité des équipes de travail et des espaces sur le chantier.

Débutant au milieu des années 90, les recherches sur l'emplacement de travail (*Space Planning*) proposent de modéliser le positionnement des équipes de travail dans les différents secteurs du chantier. Plutôt que de simplement lister et ordonnancer l'ensemble des tâches à exécuter,

le *Space Planning* permet d'utiliser le positionnement des équipes de travail dans les secteurs comme base pour planifier et optimiser les travaux. Les recherches se sont concentrées sur la détection et la résolution des conflits spatiaux et l'optimisation des échéanciers au moyen de modèles mathématiques ou graphiques, qu'ils soient statiques ou dynamiques. Selon notre connaissance de l'état de l'art, à ce jour, aucune recherche n'a catégorisé ou normalisé les artefacts visuels pour représenter le flux de travail, statique ou dynamique, des différents types de professions sur le site. Ainsi, un des objectifs de la présente recherche est de développer des artefacts visuels standardisés pour représenter le flux de travail durant la planification des opérations de construction pour les projets de bâtiments. Car, les capacités de la planification par emplacement de *Space Planning*, et plus particulièrement la Modélisation Chronographique, reposent principalement sur leurs capacités de représenter les équipes de travail dans les secteurs où les travaux doivent être effectués. Cela offre la possibilité aux gestionnaires de projets du milieu de la construction de mieux visualiser et gérer le flux des travaux, tout en facilitant la communication du plan de match à l'ensemble de l'équipe de construction.

La revue de littérature du chapitre 1 commence par dresser un historique de la planification dans la construction, qui commence par les réseaux graphiques qui ont mené aux techniques présentement utilisées, qui permettent une représentation à l'échelle du temps, comme les Gantt et les *Lines of Balance* (LOB). Cependant, bien que ces techniques soient les plus utilisées dans la planification de projets de construction, elles ne sont pas spécifiquement conçues pour la construction. Cela a mené au développement de techniques de planification spécifiques à la construction comme le *Space Planning*, les modèles mathématiques et les modélisations. Il faut également souligner les avancements technologiques de ces dernières années, principalement celles liées au BIM qui ont permis la création et la visualisation 4D des échéanciers. Cependant, la planification des travaux n'est qu'une partie de l'enjeu, car il faut être en mesure d'utiliser ces techniques et ces outils afin de gérer et d'optimiser les différents flux, et de faire la détection des congestions sur le chantier. Il est donc essentiel que cette recherche puisse représenter la

réalité sur les chantiers et communiquer l'information d'une manière claire. Ainsi, le chapitre 2 présente les objectifs de la présente recherche, la méthodologie suivie, ainsi qu'un résumé des articles intégrés à cette thèse.

Le chapitre 3 vise quant à lui à analyser les technologies de relevés disponibles, car il était essentiel de relever la position et, si possible, l'occupation des ressources présentes sur les chantiers. Cette analyse a été menée en listant et en priorisant les principaux critères qui peuvent influencer le choix d'une technologie pour cette recherche et par les entrepreneurs. Car, bien qu'on ne puisse ignorer l'évolution rapide des technologies, les besoins des entrepreneurs évoluent également. Ils peuvent aussi changer en fonction des besoins et de la taille du chantier, et de l'entrepreneur. Une procédure est donc proposée qui permettra aux entrepreneurs de choisir la technologie la mieux adaptée à leurs besoins.

Les paramètres influençant la position et l'occupation des ressources ont été obtenus en effectuant une étude détaillée de ces relevés. Le chapitre 4 vise donc à représenter l'occupation des espaces par les opérations de construction sur les chantiers sous forme d'artéfacts statiques. La capacité accrue de modélisation de l'utilisation des espaces disponibles permet aux gestionnaires de planifier les flux des travaux plus efficacement, de minimiser le mouvement des ressources, d'optimiser l'utilisation des espaces et d'améliorer la sécurité sur les chantiers de construction. Par conséquent, un protocole normalisé est nécessaire pour faciliter la modélisation et la communication de l'information sur les chantiers. Ces artéfacts montrent schématiquement, avec des représentations statiques et dynamiques, les taux d'occupation du site par les opérations de construction. Cette manière permet aux gestionnaires de modéliser, de planifier et d'optimiser l'utilisation des espaces, évitant ainsi la congestion ou la relaxation des différentes zones du site tout en favorisant une production linéaire et uniforme.

Par sa nature, la construction d'un bâtiment est une opération très dynamique. Non seulement en termes de mouvement des travailleurs et des ressources, mais aussi en termes d'espace et de

secteurs disponibles. Selon notre connaissance, il n'y a actuellement aucun système en place pour surveiller efficacement cette évolution dynamique des secteurs. Le chapitre 5 propose donc une structure de répartition dynamique des secteurs. Le gestionnaire sera en mesure de représenter l'évolution dynamique des différents niveaux, étages et secteurs nécessaires à la construction, et d'optimiser l'échéancier des travaux du bâtiment.

Finalement, une méthodologie englobant le tout est présentée dans le chapitre 6. Cette méthodologie permet d'ajouter une couche d'information supplémentaire à la Modélisation Chronographique dans le but de proposer une méthodologie basée sur la modélisation spatio-temporelle dynamique des travaux afin de calculer et d'anticiper le taux d'occupation du site. Cela permettra aux gestionnaires d'utiliser ces taux d'occupation comme critère de nivellement et d'optimisation des échéanciers de construction.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

La gestion de l'espace disponible sur un chantier a un impact direct sur la durée, les coûts et la sécurité d'un projet (Mawdesley, Al-jibouri & Yang, 2002). Malgré cela, cette discipline reste souvent sous-estimée par les gestionnaires de projets (Guo, 2002) et reste un exercice assez difficile et peu connu des gestionnaires. Il faut noter que les méthodes traditionnelles de planification des projets de construction, orientées vers une représentation graphique uniquement des activités et de leurs contraintes, sont peu adaptées à optimiser la gestion des espaces sur les chantiers, car la disponibilité des espaces n'est pas considérée. Les types d'espaces sur un chantier sont variés (espaces de travail, de stockage, de circulation, d'accès au chantier, etc.). De plus, ces espaces sont dynamiques et évoluent dans le temps selon les différentes phases d'exécution du projet (Francis & Morin-Pepin, 2017), ce qui rend chaque projet de construction unique. Il est donc difficile d'établir une méthode universelle de gestion des espaces (Mawdesley *et al.*, 2002). Pour cela, la gestion des espaces sur le chantier est laissée à la discrétion du gestionnaire et de son surintendant (Akinci & Fischer, 2000). Ces derniers sont peu outillés et essaient de régler les conflits d'utilisation des espaces par une négociation directe sur le chantier en réaction aux besoins d'espaces des entrepreneurs spécialisés et des fournisseurs. Ce mode de fonctionnement occasionne régulièrement des déplacements inutiles des matériaux, des équipements et des travailleurs. Cela a donc pour effet d'augmenter les risques d'accidents et de blessures, et contribue à des pertes de temps, de productivité et occasionne des conflits. Déjà en 1989, Sanders, Thomas, Smith & Mannering (1989) évaluaient une perte d'efficacité de l'ordre de 65% due aux congestions d'espaces. Malgré la fréquence de ces conflits, l'industrie ne considère toujours pas l'espace disponible lors de la planification de travaux à venir (Akinci & Fischer, 2000).

Les méthodes traditionnelles de planification, dites du chemin critique, représentées habituellement sous la forme Gantt-Précédence, sont basées uniquement sur la logique d'exécution des activités de construction. Ces techniques ne prennent pas en compte l'ensemble des contraintes

réelles qui surviennent sur un chantier, telles que la planification des espaces, les zones de travail, et la gestion des déplacements de la main-d'œuvre, des matériaux et du cycle inversé. Ce qui n'est pas modélisé ne peut pas être géré proprement, tout modèle doit permettre de bien identifier les sources des problèmes, et même être en mesure de mesurer de l'anticiper avant le début des travaux (Francis, 2015). Pour remédier à cette situation, plusieurs travaux ont étudié la gestion des espaces. Certains proposent de définir les espaces en fonction de leur état d'occupation (libre, occupé) (Winch & North, 2006), d'autres en fonction de leur type d'utilisation (travail, stockage, circulation) (Riley & Sanvido, 1995) ou encore en fonction des besoins des intervenants (Frandsen & Tommelein, 2014). Des modèles ont aussi décrit le comportement des espaces en fonction de la nature des travaux réalisés (Riley & Sanvido, 1995) ou selon leurs évolutions physiques au cours de la réalisation de l'activité (Zouein & Tommelein, 2001). L'objectif commun de ces différentes recherches est de détecter des conflits d'espaces afin d'éviter les congestions. En effet, l'incidence des congestions d'espaces sur la planification est un problème bien connu dans la construction.

1.1 Historique des méthodes de planifications de projet de construction

Tout projet, peu importe sa nature, demande l'utilisation de réseaux d'ordonnancement et d'échéanciers pour représenter l'ordre d'exécution des étapes, du début du projet jusqu'à la fin de celui-ci. Développé et utilisé depuis plus de cent ans, le diagramme à bandes, appelé aussi diagramme de Gantt (Figure 1.3), est la méthode la plus utilisée en raison de sa facilité d'interprétation. En effet, comme chaque tâche est représentée sur une ligne distincte, il est facile de suivre l'échéancier pour des projets de petite envergure. Cependant, cet avantage s'estompe à mesure que les projets grossissent et deviennent de plus en plus complexes. Dans ces situations, l'échéancier Gantt devient rapidement difficile à lire et à interpréter.

Le Gantt est basé sur les réseaux graphiques utilisant la méthode du chemin critique, ou en anglais *Critical Path Methods (CPM)*, qui ont deux variations connues : i) la méthode d'activité sur flèche *Arrow Diagram Method (ADM)* et la Précédence. L'ADM (Figure 1.1) est un type de réseau basé sur la théorie des graphes qui utilise des flèches pour identifier les activités. Ces

flèches sont ensuite reliées entre elles avec des nœuds appelés « évènements » afin de calculer un ordonnancement d'exécution des travaux. Originellement, les CPM ont été conçues strictement déterministes et n'incluent pas des probabilités dans le calcul du chemin critique. Une difficulté supplémentaire survient lors de la modification du réseau, car des nœuds doivent être ajoutés ou supprimés, l'identification des activités doit donc changer. Il devient donc difficile de représenter efficacement le WBS (Francis, 2017a). De plus, Olivieri, Seppänen & Denis Granja (2018) ont relevé trois (3) principales causes pour les problèmes de flux de travail lors de la planification avec les réseaux CPM : i) Le début des tâches le plus tôt possible, ii) les durées variables et iii) l'incapacité des CPM à proprement planifier des travaux en continu.

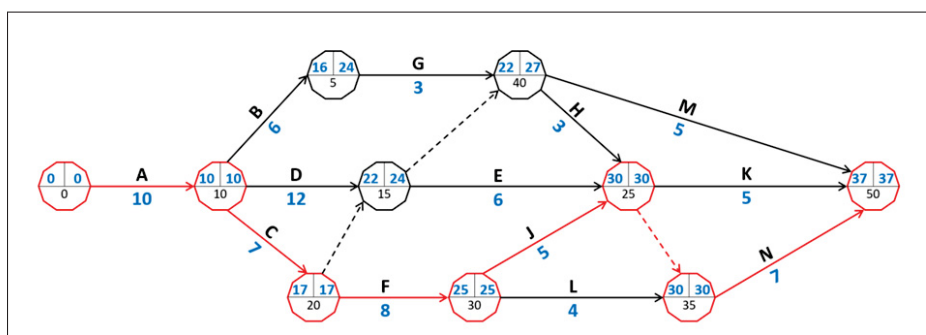


FIGURE 1.1 Exemple de réseau CPM

La Précédence (Figure 1.2) a été développée pour produire des échéanciers plus facilement compris par le chantier. La principale différence est l'affichage des activités sur les nœuds plutôt que sur les flèches. Cela facilite la représentation des quatre (4) types de liens utilisés pour montrer la logique de construction du projet : i) début-début, ii) fin-début, iii) fin-fin et iv) début-fin. Cette méthode règle partiellement certains problèmes rencontrés avec les CPM. Par contre, parce qu'elle est une méthode simplifiée, elle est une méthode inexacte. Cette méthode comporte plusieurs anomalies liées au calcul du réseau affectant du coup la validité du chemin critique et des marges. Ces anomalies seront discutées ci-après.

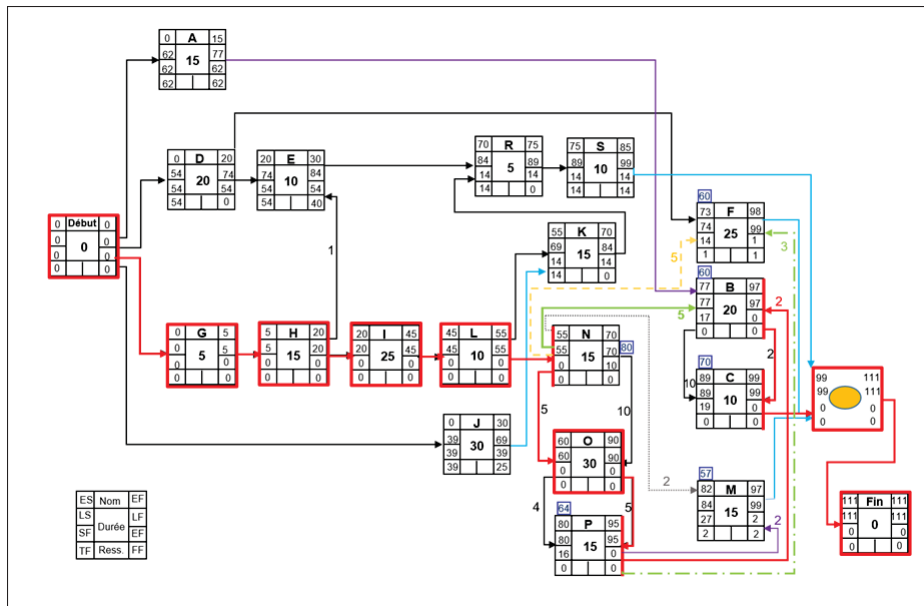


FIGURE 1.2 Exemple de réseau de Précédence

1.1.1 La planification à l'échelle du temps

1.1.1.1 Les diagrammes à bandes

La capacité de représenter les échéanciers à l'échelle du temps est un avantage considérable lors de la conception, de l'analyse et de la mise à jour des échéanciers. Les diagrammes à bandes, mieux connues sous le nom de Gantt, en raison des travaux effectués par Henry L. Gantt dans le domaine (Weaver, 2012), emploient un affichage à deux (2) dimensions pour représenter la planification. Le temps est représenté sur l'axe horizontal alors que les activités sont représentées sur l'axe vertical. De plus, la démocratisation de l'informatique et l'arrivée de logiciels tels que MS Project (Figure 1.3) et Primavera ont permis de faciliter l'utilisation de ce type de réseau. Cela a fait qu'ils sont devenus la norme dans le domaine de la construction.

Cependant, comme ce type de réseau repose sur la logique de la préséance, il propose uniquement d'effectuer des contraintes externes et de simuler la production avec les marges sur le temps. La logique manque donc de précision et diminue la fiabilité de l'échéancier (Francis, 2017a). De

plus, Hinze (2004) a déclaré que tout changement dans la séquence des activités ne peut être facilement établi dans un diagramme de Gantt.

Il est également facile de constater que le nombre d'activités représentées dans un diagramme de Gantt n'est pas proportionnel à la superficie affichée. Cela entraîne une utilisation non optimale des plans de construction (Francis, 2004). De plus, l'utilisation intensive d'activités et de contraintes rend la lecture difficile, car ces contraintes sont souvent denses et entrecroisent les lignes représentant les activités (Francis, Miresco & Meur, 2019).

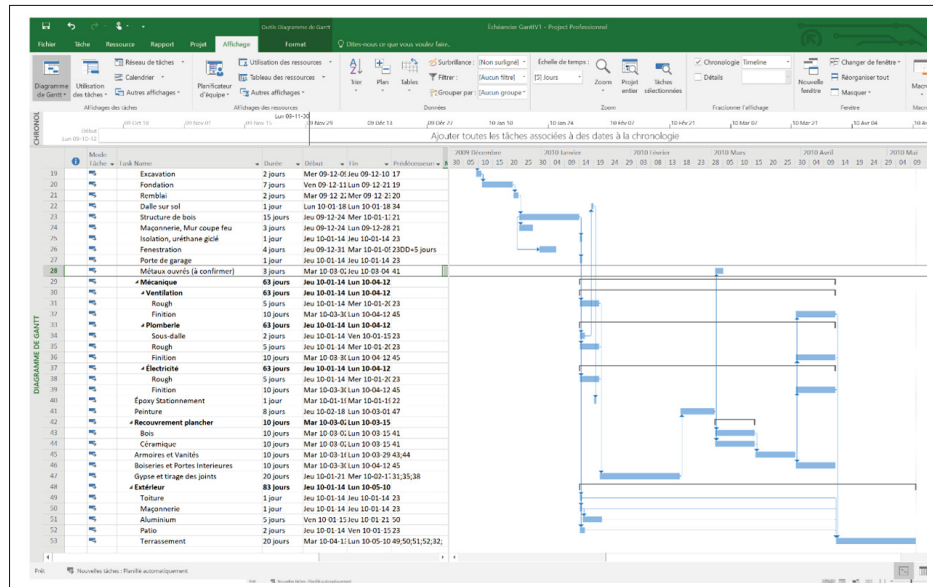


FIGURE 1.3 Échéancier Gantt sous MS Project

1.1.1.2 Les diagrammes linéaires (*Line of Balance*)

Les diagrammes linéaires, mieux connus sous le nom de *Line of balance* (LOB), sont dérivés de l'industrie manufacturière et développés par la U.S. Navy pour la planification et le contrôle de projets à caractère répétitif (Neale & Neale, 1989). Le LOB est décrit comme un outil de planification orienté sur la productivité des ressources et la planification d'un projet. Cette méthode de planification peut produire des échéanciers plus réalistes que ceux basés sur des activités (Trimble, 1984). Comme pour le Gantt, le LOB (Figure 1.4) représente ses échéanciers sur des graphiques à deux (2) dimensions.

Le principal avantage de ce type de graphique est qu'il est possible de visualiser directement la productivité des équipes et d'optimiser l'échéancier en fonction de celle-ci. De plus, les conflits sont visibles directement sur l'échéancier. Ainsi, il est très utilisé pour la planification de travaux linéaire comme des routes et des pipe-lines. Cette capacité des LOB fait qu'il est utilisé par plusieurs des systèmes décrits dans ce document. Cependant, son application sur des projets non répétitifs n'est pas recommandée et l'affichage peut devenir encombré lors de projets d'envergures.

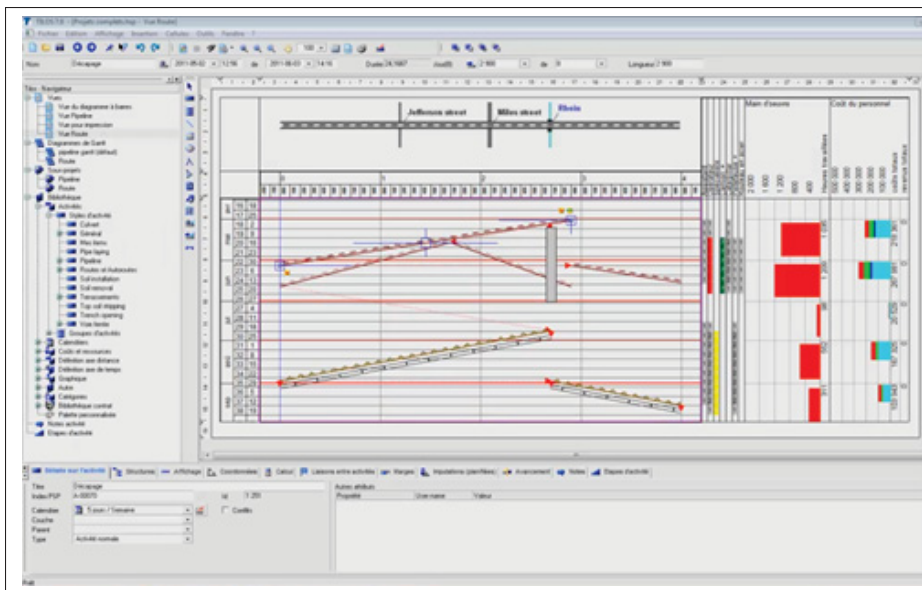


FIGURE 1.4 Exemple d'échéancier linéaire sur l'application TILOS

1.2 Méthodes de planifications spécifiques à la construction

1.2.1 Les origines du Space Planning

Comme mentionné précédemment, les techniques de planification actuellement utilisée, notamment la logique Gantt-Précédence, modélisent les activités de construction et la logique de dépendance entre elles. Il faut noter que de nombreux défauts, déjà bien connus, sont liés au calcul du réseau de cette méthode. Ces défauts incluent les anomalies des calculs inversés

Ces défauts incluent les anomalies des calculs inversés (*Reversed Critical Path*) (Wiest, 1981; Badiru, 1995; Hajdu, Skibniewski, Vanhoucke, Horvath & Brilakis, 2016); les marges fantômes et les calendriers multiples Kim & de la Garza (2005); et l'instabilité des liens logique et du chemin critique (les liens logique changent dépendamment du nombre de ressources allouées) (Francis & Miresco, 2016). En plus de ces défauts, ces techniques négligent plusieurs facteurs tels que la gestion des espaces disponibles sur le chantier, l'espace qu'occupent les ressources comme les travailleurs et les matériaux et la circulation sur le chantier (Riley & Sanvido, 1995, 1997; Thabet, 1992; Thabet & Beliveau, 1994). La popularité grandissante des projets intégrés fait qu'un partage efficace des informations est de plus en plus important, ce qui est difficile à réaliser à travers les logiciels de planification actuels tels que MS Project et Primavera (Forgues & Becerik-Gerber, 2013) qui utilisent cette logique.

Centrée sur la construction de bâtiments multiétages, où l'espace de travail est généralement restreint, une première recherche avait déjà établi, au début des années 90, un lien entre la disponibilité et la taille des espaces de travail, les travaux à exécuter et leurs effets sur la productivité (Thabet & Beliveau, 1994). Cherchant à inclure ces contraintes lors de la planification de tâches répétitives sur des projets multiétages, ce modèle de gestion des espaces passe par trois (3) équations. La première (Équation 1.1) indique que l'espace nécessaire à l'exécution d'une activité correspond à la somme de l'espace requis par chacune des ressources nécessaires à cette activité.

$$SpaceDemand_{activity} = \sum SpaceDemand_{Ressource} \quad (1.1)$$

Tirée de Thabet & Beliveau (1994)

La deuxième formule (Équation 1.2) permet d'obtenir l'espace disponible pour une activité en prenant l'espace disponible dans un secteur, auquel on soustraie l'espace utilisé par les activités qui sont déjà en cours dans ce secteur.

$$SpaceAvailability_{activity} = PhysicalSpaceofWorkArea - \sum SpaceDemandofCurrentActivities \quad (1.2)$$

Tirée de Thabet & Beliveau (1994)

La dernière formule (Équation 1.3) indique que l'espace requis pour une ressource dépend de l'espace qu'elle occupe en raison de ses dimensions physiques et de l'espace requis pour l'utilisation de celle-ci, comme les zones de sécurité et pour son déplacement.

$$SpaceDemand_{Resources} = S_{Physical} + S_{Surrounding} \quad (1.3)$$

Tirée de Thabet & Beliveau (1994)

Cependant, suivant l'avancement du chantier, l'espace disponible varie. Comme exemple, lors des travaux de finition de la dalle de béton, l'ensemble de l'étage est disponible, mais une fois les divisions montées sur celui-ci, l'étage se retrouve segmenté en plusieurs secteurs plus petits (Thabet & Beliveau, 1994). Donc, à mesure que les travaux progressent, l'espace disponible tend à diminuer, compliquant par le fait même l'accès à ceux-ci. Les auteurs ont donc établi un modèle (Figure 1.5) pour suivre l'évolution des espaces de travail dans le temps, commençant par la création de l'étage, qui est ensuite divisé en zone, et qui finalement sert à déterminer des blocs de travail (Thabet & Beliveau, 1994).

Afin de faire le lien entre la diminution de l'espace disponible et la productivité, Thabet & Beliveau (1994) ont conçu le *Space Capacity Factor (SCF)*, déterminé par l'Équation 1.4, faisant le ratio entre l'espace requis pour une activité et l'espace disponible dans le secteur. Ce ratio est ensuite utilisé pour faire un lien avec la productivité. Ainsi, l'ensemble de la procédure détaillée permet de développer un échancier en tenant compte de l'espace disponible dans les différents secteurs lors de la construction.

Le suivi de l'évolution des espaces de travail dans le temps a donc son importance, car au-delà de ces espaces de travail et de l'occupation des différentes équipes de travail et de leurs ressources,

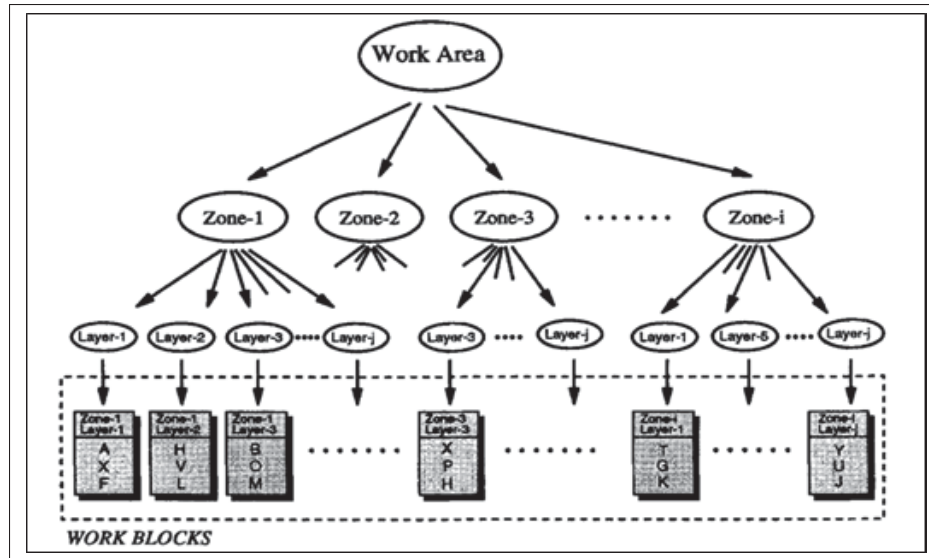


FIGURE 1.5 Évolution des espaces de travail dans le temps.
Tirée de Thabet & Beliveau (1994)

$$SpaceCapacity\ factor(SCF) = \frac{Spacedemand\ for\ Activity}{Current\ Space\ Availability} \quad (1.4)$$

Tirée de Thabet & Beliveau (1994)

chaque activité génère des restrictions liées aux déplacements des travailleurs et matériaux sur le chantier. Ainsi, lors de la gestion du projet et de sa planification, il faut également tenir compte des espaces de travail et faire une analyse des déplacements à l'intérieur du chantier (Riley & Sanvido, 1995, 1997). La modélisation des espaces de construction, ou *Construction Space-Model* (Riley & Sanvido, 1995), passe en premier lieu par la décomposition des espaces de construction selon le type de procédé (Figure 1.6), définissant ensuite si la tâche est exécutée ou si des matériaux sont requis pour l'ensemble du bâtiment, pour l'étage ou pour une pièce en construction. À la suite de l'exécution des travaux, les matériaux qui étaient conservés sur le site avant la construction occupent de l'espace en permanence.

Dans ce modèle, deux (2) types d'espaces sont définis, les « zones » (*Areas*) et les « déplacements » (*Paths*). Cela a permis d'identifier six (6) types de déplacements (Figure 1.7) : i) linéaire,

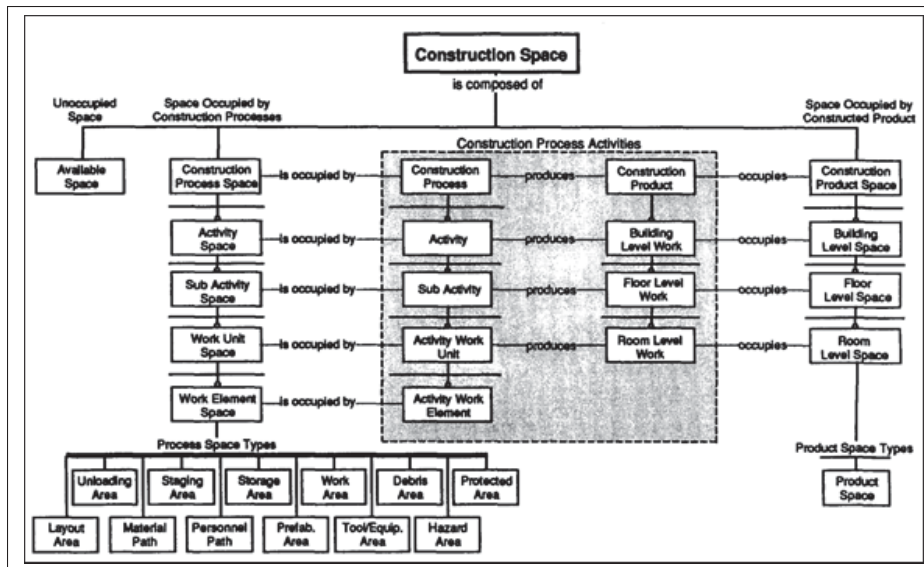


FIGURE 1.6 Décompositions des espaces de construction.
Tirée de Riley & Sanvido (1995)

ii) aléatoire, iii) unité de surfaces horizontales, iv) unité verticale, v) spirale et vi) façade du bâtiment. Combiné à la décomposition des espaces de travail, il devient ainsi possible de prédire le déplacement et l'emplacement des matériaux sur le chantier avant leur utilisation. Lors de leurs études, Riley & Sanvido (1995) ont donc observé que, durant la construction de bâtiments multiétages, le déplacement des équipes est prévisible. Cette prévisibilité devient donc un atout pour la conception des échéanciers, car elle permet d'anticiper et de minimiser les déplacements inutiles et les conflits avant qu'ils ne surviennent.

Les travaux abordés dans cette section font partie des premiers à considérer les espaces disponibles sur les chantiers comme une ressource à part entière qui doit être gérée et suivie. Ils sont ainsi les précurseurs à tous les travaux en lien avec le *Space Planning*, principalement les travaux discutés dans la section 1.2.3. Également, les équations et modèles présentés sont toujours d'actualités sur les chantiers et, surtout, dans les recherches en lien avec ce sujet et seront utilisés dans la présente recherche.

Il faut aussi mentionner que ces systèmes s'adressent principalement aux entrepreneurs généraux et à leur équipe de gestion de chantier. Mais généralement, les ressources et le temps dont ces

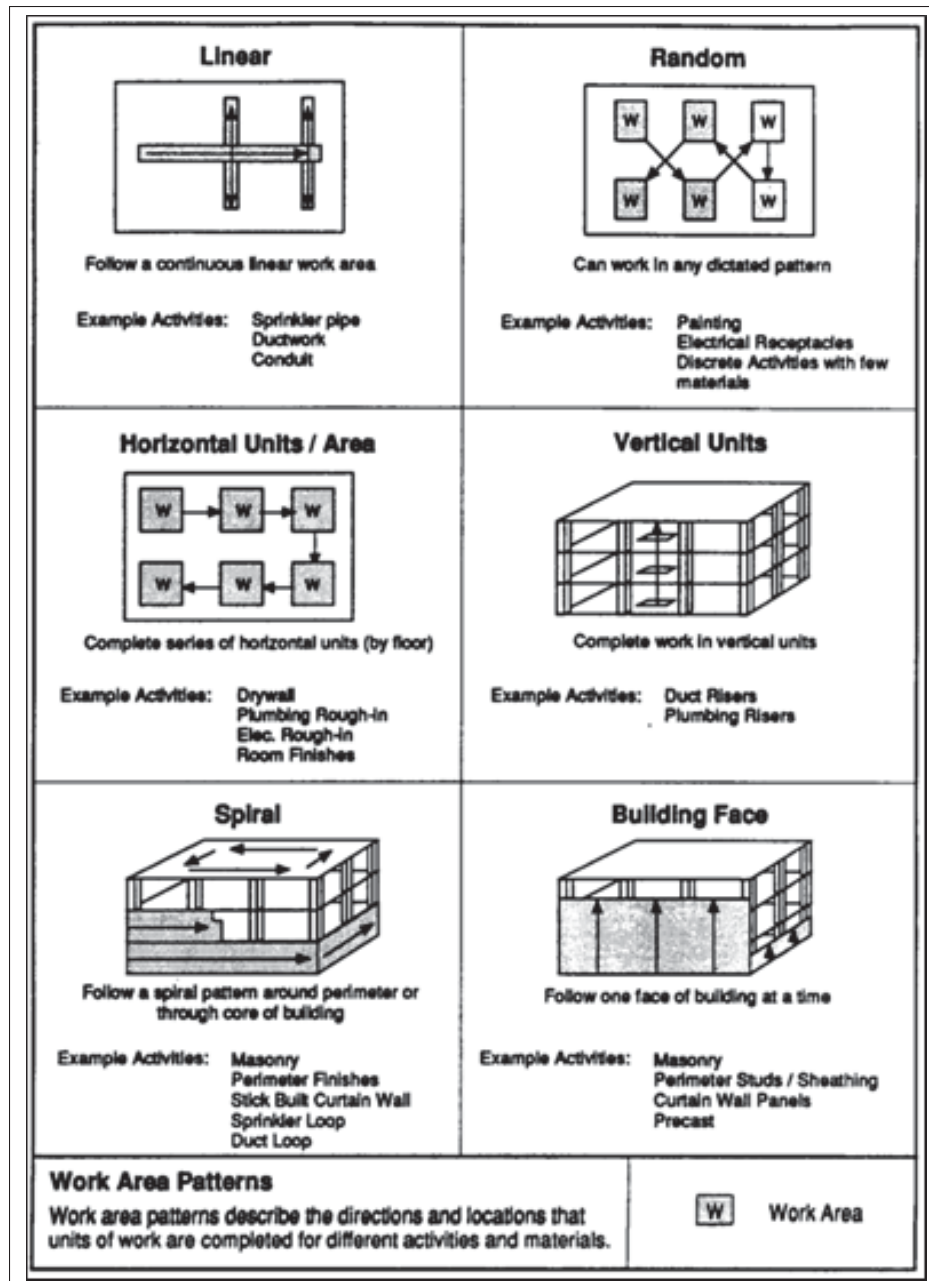


FIGURE 1.7 Déplacements des équipes de travail. Tirée de
Riley & Sanvido (1995)

équipes disposent sont utilisés à plein de capacités. Ainsi, l'ajout de tâches supplémentaires pour la collecte d'informations et la gestion d'un projet peut potentiellement ajouter un stress supplémentaire à une équipe de gestion déjà très occupée. L'utilisation d'informations déjà

disponibles aux gestionnaires de projets devrait faciliter l'intégration et l'utilisation de toutes nouvelles procédures et systèmes, tel que celles présentes dans cette section, en limitant les tâches supplémentaires à effectuer par l'équipe de gestion.

La nature d'un projet de construction fait que la construction d'un bâtiment est un processus très dynamique, les travailleurs et travailleuses sont en constant déplacement, des matériaux sont livrés et utilisés et de la machine entre et sort du chantier. Cet aspect dynamique des chantiers est déjà partiellement représenté dans les travaux de Riley & Sanvido (1995) avec la représentation des déplacements des équipes de travail (Figure 1.7). Cependant, comme dans la majorité des recherches sur le *Space Planning*, leur définition des espaces disponibles sur le chantier est fixe pour toute la durée de la construction. Comme discuté plus loin dans ce document, cette représentation fixe des espaces disponibles est peu réaliste, car elle néglige les étapes de créations d'espace (ex. : lors de l'érection de la superstructure), de la fermeture temporaire de certains secteurs (ex. : des raisons de sécurité ou de protection) et de la création d'espaces temporaires (ex. : remisage de matériaux ou de stationnements pour les travailleurs).

Bien que les recherches mentionnées ci-haut se concentrent sur les tâches répétitives de projets multiétages, les projets de construction de bâtiments, en dehors de la construction de tours de condominiums et de certains projets commerciaux et industriels, sont rarement de nature répétitive. Cependant, en effectuant une bonne division des secteurs, les déplacements illustrés par Riley & Sanvido (1997), à la figure 1.7, peuvent facilement être adaptés à des tâches qui initialement semblent non répétitives, qui font partie des objectifs de la recherche présentée dans ce document.

1.2.2 Les modèles mathématiques

Tout projet de construction a besoin d'installations temporaires pour opérer et la disposition de ces installations peut avoir un impact important sur le bon déroulement des activités lors de la construction. Comme beaucoup d'éléments en lien avec la planification et le positionnement des ressources, les gestionnaires dans la construction effectuent généralement cette tâche en

utilisant leur instinct et leur expérience. C'est donc pour cela que de nombreuses recherches et publications ont proposé d'utiliser des algorithmes d'optimisations mathématiques afin d'améliorer la planification de l'aménagement des chantiers, l'objectif étant d'améliorer la productivité et d'optimiser le processus de construction et des installations temporaires sur le chantier. Ainsi, Xu, Mei, Luo & Tan (2020) mentionnent que l'utilisation d'algorithmes mathématiques appropriés pourrait offrir des avantages considérables aux gestionnaires de projet lors de la planification de l'aménagement sur les chantiers qui sont de plus en plus complexes et congestionnés. Pour ce faire, ces algorithmes demandent généralement d'identifier un ou plusieurs objectifs que l'aménagement doit respecter. Une fois identifiés, ces objectifs sont présentés sous forme d'une fonction objective qui, combinés aux contraintes spécifiques du problème d'aménagement, seront optimisés avec l'aide de l'algorithme mathématique choisi (Osman, Georgy & Ibrahim, 2003). Xu *et al.* (2020) et Ardila & Francis (2020) listent et classent l'ensemble des modèles mathématiques utilisés pour résoudre les problèmes d'aménagement d'optimisation mathématiques dans trois (3) catégories : (i) heuristiques, (ii) métaheuristique et (iii) exacte.

Parmi les méthodes heuristiques et métaheuristiques, on retrouve les algorithmes génétiques, les essaims particulaires, les colonies de fourmis et autres. Ces méthodes sont souvent utilisées pour les problèmes à grande échelle, car elles demandent généralement moins de temps de calcul que les méthodes exactes (Rao, 2019). C'est pour cela que la majorité des publications sur la planification de l'aménagement des chantiers utilisent donc des modèles heuristiques (Hawarneh, Bendak & Ghanim, 2021). En effet, sur les 73 publications traitant de l'aménagement de chantier identifiées dans le cadre de cette revue de littérature, 51 utilisaient des algorithmes mathématiques, dont 45 utilisaient des modèles heuristiques et métaheuristiques. Comme ces méthodes n'opèrent pas sur l'ensemble des données et des contraintes disponibles pour le problème, elles ne permettent pas de fournir une solution optimale (Osman *et al.*, 2003). De leur côté, les méthodes exactes, comme simplexe, séparation et évaluation, plans sécants et autres, sont en mesure de fournir une solution optimale à des problèmes avec un seul ou plusieurs

objectifs d'optimisation. Cependant, comme elles demandent plus d'effort de calcul, elles sont habituellement recommandées pour les problèmes de petite envergure (Hawarneh *et al.*, 2021).

La construction d'une structure est évidemment un projet de nature très dynamique, mais en regardant l'historique des publications sur le sujet, (Hawarneh *et al.*, 2021) ont remarqué qu'un pourcentage assez important dans les travaux de recherche sur les problèmes d'aménagement, de gestion et d'optimisation des chantiers de construction utilisaient des modèles d'optimisation statique. Idéalement, la planification de l'aménagement des chantiers devrait refléter cette nature dynamique, afin de considérer les dates d'arrivée des matériaux ainsi que l'occupation de l'espace disponible à différentes étapes de la construction. C'est donc pour cela qu'à partir de 2009, la plupart des travaux de recherches dans ce domaine se sont concentrés sur les approches dynamiques, puisque le problème d'aménagement des chantiers possède une nature dynamique (Hawarneh *et al.*, 2021).

1.2.2.1 Aménagement extérieur

Comme mentionné au début de cette section, la majorité des problèmes d'optimisations des installations extérieures sur les chantiers doivent remplir un ou plusieurs objectifs. Dans le cadre des installations extérieures, l'objectif qui revient le plus est de minimiser les coûts de transport entre ces installations (Sanad, Ammar & Ibrahim, 2008). Ainsi, la formule 1.5 est une des plus utilisées, où n = le nombre total de bâtiments ; d_{ij} = la distance entre les bâtiments i et j ; et R_{ij} = un paramètre qui représente : (1) les coûts de transport entre les bâtiments i et j ou (2) un autre poids de proximité requis pour répondre à l'objectif d'optimisation entre les bâtiments i et j (Sanad *et al.*, 2008). Cependant, chaque projet de construction demande et possède une série de variables qui lui est propre (Figure 1.8), ainsi, la planification de l'aménagement d'un chantier est une tâche à objectifs multiples qui, lors de la construction, varie d'une phase à l'autre (Zolfagharian & Irizarry, 2014).

Yeh (1995) est un des premiers à avoir utilisé un algorithme mathématique afin d'optimiser le positionnement des installations sur un chantier. Pour ce faire, il a présenté une série prédéfinie

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} R_{ij} \quad (1.5)$$

Fonction objective généralement utilisée dans les algorithmes mathématiques pour l'optimisation de l'aménagement des chantiers. Tirée de Sanad *et al.* (2008)

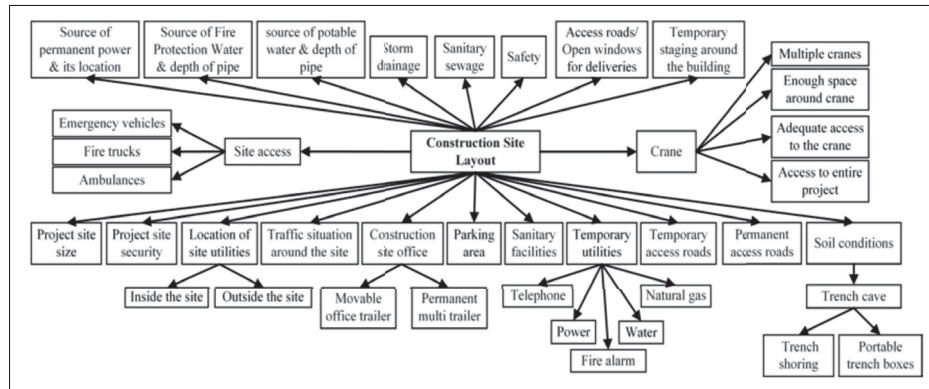


FIGURE 1.8 Variables à analyser pour planifier l'aménagement d'un chantier. Tirée de Zolfagharian & Irizarry (2014)

de sites et de bâtiments pour ensuite utiliser un *Annealed Neural Network* pour générer des aménagements de chantier alternatif et ainsi aider les gestionnaires dans la planification de l'aménagement d'un chantier.

Les algorithmes génétiques sont une des méthodes mathématiques les plus utilisées dans la littérature et Philip, Mahadevan & Varghese (1997), Li & Love (1998), Mawdesley *et al.* (2002) et (Osman *et al.*, 2003) les ont utilisées en démontrant que cet algorithme était capable de trouver des solutions à ce problème en peu de temps de calcul. Cependant, Mawdesley *et al.* (2002) indiquent qu'il faut améliorer les recherches en amont du processus de calcul comme la qualité des données initiales, le temps requis, le niveau de détail et le développement et l'utilisation des données à base de données, etc. Osman *et al.* (2003) ont également mentionné qu'il était nécessaire de tenir compte de plusieurs objectifs de natures différentes lors de la planification de l'aménagement des chantiers, ils ont donc combiné les algorithmes génétiques à un modèle

CAD afin de modéliser des contraintes géométriques sur CAD plutôt qu'à travers des formules mathématiques, facilitant ainsi leur interprétation par les gestionnaires. Chau (2004) a, de son côté, proposé une solution à deux niveaux, où le niveau le plus bas utilisait de la programmation linéaire afin de représenter l'aménagement instantané, alors que le niveau supérieur utilisait les algorithmes génétiques afin de représenter l'aspect dynamique des opérations. En utilisant l'algorithme A* en conjonction avec les algorithmes génériques, Kumar & Cheng (2015) ont profité des capacités du BIM afin de développer une plateforme qui permet de facilement extraire les informations requises aux calculs afin de créer des aménagements de chantier dynamique. Concernant les algorithmes génétiques, Lam, Ning & Lam (2009) soulèvent que la sélection aléatoire de la population initiale peut affecter la qualité de la solution. Afin d'y remédier, ils ont combiné les algorithmes génétiques aux colonies de fourmis, où la colonie de fourmis générerait une population initiale de meilleure qualité pour ensuite procéder à l'optimisation avec les algorithmes génétiques.

D'autres algorithmes ont été utilisés dans l'objectif d'améliorer les performances de calcul face aux algorithmes génétiques tels que les algorithmes d'optimisation par colonies de fourmis pour planifier l'aménagement de moyens et de gros chantiers (Samdani, Bhakal & Singh, 2006; Gharaie, Afshar & Jalali, 2006) et pour générer des aménagements dynamiques (Abdelrazig, 2015; Ning, Lam & Lam, 2010) ou les essaims particuliers (Zhang & Wang, 2008; Lien & Cheng, 2012; Xu & Li, 2012).

El-Rayes & Said (2009) ont utilisé la programmation dynamique approximative afin de représenter l'aspect dynamique des chantiers de construction qui avait les capacités de ; i) trouver un plan d'aménagement optimal qui minimisait les coûts pour toute la durée du projet et ii) modéliser les différentes contraintes géométriques qui existent entre les installations temporaires afin de refléter les contraintes opérationnelles, organisationnelles et/ou de sécurité. Plus récemment, Kaveh, Khanzadi, Alipour & Moghaddam (2016) ont étudié l'utilisation de deux récents algorithmes métaheuristiques, soit : i) *Colliding Bodies Optimization* et ii) *Enhanced Colliding Bodies Optimization* afin d'améliorer les solutions proposées et d'augmenter davantage les performances de calcul dans la planification dynamique des aménagements de chantier.

Comparativement aux méthodes heuristiques, on retrouve peu de publications qui utilisent des modèles d'optimisation exacts. Easa & Hossain (2008) furent parmi les premiers en utilisant un système de coordonnées continues afin de positionner les installations temporaires qui permettait de considérer des objets de différentes formes et possédant différentes configurations tout en considérant une variété de contraintes physiques et fonctionnelles. Osman & Georgy (2012) ont donc utilisé le *Goal Programming*, qui est un algorithme qui a la capacité de traiter plusieurs objectifs conflictuels, afin de se concentrer sur les objectifs d'optimisation, car lors de la planification de l'aménagement, plusieurs objectifs doivent être respectés simultanément et peuvent même entrer en conflit. Cela leur a permis de proposer une solution qui peut satisfaire au plus grand nombre d'objectifs possibles plutôt que d'optimiser un seul objectif (Osman & Georgy, 2012).

1.2.2.2 Aménagement intérieur

Jang, Kim & Russell (2003) ont profité des performances de calcul des algorithmes génétiques pour positionner les différentes ressources requises à l'intérieur lors de la construction d'un bâtiment multiétages où le terrain extérieur n'est pas disponible pour les installations temporaires.

Lucko, Said & Bouferguene (2014) ont adapté les fonctions de singularité pour ajouter une troisième dimension aux échéanciers afin de représenter la progression des activités dans le temps et l'espace. Le positionnement et le déplacement des activités est représenté en 2D sur le plan horizontal, soit les axes $x[m]$ et $y[m]$ sur la Figure 1.9. Par la suite, la fonction singularité étend ces activités dans la troisième dimension, axe $z[h]$ sur la Figure 1.9. Une fonction de planification heuristique est ensuite appliquée pour optimiser l'échéancier afin de minimiser la durée des travaux, tout en évitant les conflits spatiotemporels.

Isaac, Su, Lucko & Dagan (2017) ont développé un modèle qui lie la planification, l'aménagement du chantier (intérieur et extérieur) et la gestion de la sécurité afin de représenter le déplacement des équipes tout en évitant les conflits entre ceux-ci. Le modèle montre les déplacements des équipes sur un plan cartésien en 2D et le temps est représenté sur la troisième dimension du

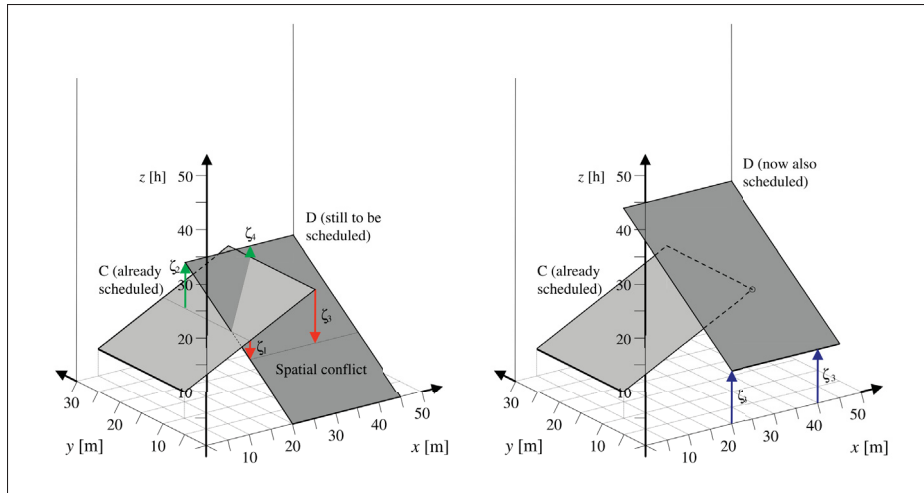


FIGURE 1.9 Représentation spatiotemporelle des conflits et des activités sur un échancier 3D. Tirée de Lucko *et al.* (2014)

modèle, alors que la sécurité est identifiée comme une contrainte spatiotemporelle rigide. Une fonction de singularité est ensuite utilisée pour modéliser et optimiser la durée des travaux et l'allocation de l'espace disponible, tout en respectant les contraintes de sécurités établies.

La complexité des modèles mathématiques augmente quand les objectifs d'optimisation et les contraintes sont modifiés ou sont ajoutés, il est donc difficile et déroutant de trouver l'algorithme approprié afin de résoudre un problème d'aménagement du chantier en raison des avantages et des inconvénients de chacun des modèles (Xu *et al.*, 2020). Ces algorithmes sont généralement complexes, car ils considèrent toutes les variables possibles. Vue la taille de la tâche, ces algorithmes sont efficaces dans seulement certains cas, car ils sont basés sur des hypothèses réductrices et demandent que le projet se déroule sans aucun élément inattendu et ne considèrent rarement les conditions réelles du site (Francis & Miresco, 2013; Francis *et al.*, 2019; Francis, 2019). Le coût de la modélisation devient donc disproportionné comparé aux bénéfices. Ainsi, chaque modèle choisit les paramètres qu'il considère importants et néglige les autres, cela a donc un effet négatif sur les résultats (Francis, 2019).

Les experts sont difficiles à identifier, et solliciter leurs expertises est reconnue comme «le goulot d'étranglement de l'IA», ainsi les ordinateurs n'ont pas accès à toute l'expertise que

possède l'humanité (Tommelein, Levitt, Hayes-Roth & Confrey, 1991). Osman & Georgy (2012) notent que le facteur humain joue un rôle important dans la planification de l'aménagement d'un chantier, ainsi, juger la qualité d'un aménagement est un processus subjectif. Afin d'atténuer les lacunes des modèles mathématiques, Xu *et al.* (2020) proposent de les enrichir, sous des conditions plus réalistes, en incorporant plus d'algorithmes exacts dans des systèmes hybrides et en intégrant des technologies comme le BIM, la vision par ordinateur et l'Internet des objets.

Bien que plusieurs recherches aient proposé des modèles permettant de tenir compte de la nature dynamique des chantiers, il y a encore quelques questions importantes qui n'ont pas été abordées dans la littérature sur les modèles d'optimisation mathématique d'aménagements temporaires de chantiers. Premièrement, considérant le facteur humain, certains membres de l'équipe de construction pourraient s'opposer à l'utilisation de l'aménagement proposé, surtout si celui-ci diffère des méthodes traditionnelles. Ainsi, qu'arrive-t-il de l'aménagement si une partie de l'équipe de construction ne respecte pas le plan généré ? Ensuite, bien qu'une planification de qualité aille un effet positif sur le déroulement du chantier, aucun projet de construction ne se déroule exactement selon le plan de match initialement prévu par l'équipe de gestion. Cela nous amène ainsi à nous demander, qu'arrive-t-il de l'aménagement lorsque, à la suite d'un imprévu, celui-ci doit être modifié pendant les travaux ?

1.2.3 Les modélisations

1.2.3.1 Le SightPlan

Lors de l'élaboration d'un plan d'aménagement, il existe des différences importantes entre les procédures utilisées par les gestionnaires dans la construction et celles présentées par les procédures mathématiques discutées ci-dessous. Tommelein *et al.* (1991) furent parmi les premiers à reconnaître les limitations de ces procédures mathématiques, car elles n'ont pas accès à l'expertise des gestionnaires de projet afin de créer des aménagements de qualité. Tommelein a donc étudié l'intelligence artificielle (IA) (Tommelein, 1989; Tommelein *et al.*, 1991), ainsi que les algorithmes d'optimisation mathématiques (Zouein & Tommelein, 1994,

1999), principalement heuristiques, afin d'intégrer l'expertise des gestionnaires de la construction dans un processus de création semi-automatisé de l'aménagement d'un chantier, appelé *SightPlan*. L'objectif principal était de mieux comprendre le processus de création d'un plan d'aménagement plutôt que d'automatiser sa création.

Tommelein *et al.* (1991) ont donc expérimenté sur trois (3) modèles de conception différents pour l'élaboration des aménagements de chantier. En premier, l'*Expert Model* avait pour objectif d'émuler les décisions stratégiques prises par des gestionnaires d'expérience. Par la suite, ils ont combiné les connaissances obtenues dans l'*Expert Model* à l'IA pour générer une très grande quantité de solutions alternatives. Cependant, si trop d'aménagements alternatifs sont présentés, le temps requis par les gestionnaires pour analyser ces alternatives devient rapidement prohibitif. Pour contrer cela, un modèle interactif a été développé, permettant aux gestionnaires d'introduire des contraintes personnalisées, facilitant ainsi la tâche aux gestionnaires pour identifier les bonnes solutions.

Leurs modélisations des méthodes utilisées par les gestionnaires pour aménager leurs chantiers et leurs suggestions sur comment améliorer ces aménagements suggèrent qu'un système homme-machine aurait de bonnes chances de proposer de meilleures solutions qu'une personne ou un ordinateur travaillant seul.

Et déjà, au début des années 90, Tommelein, Levitt & Hayes-Roth (1992) soulevaient que la divergence entre la disponibilité des outils informatiques et leurs utilisations était due à (1) la difficulté à identifier l'outil approprié, (2) la grande quantité de données requises pour rendre ces outils utilisables, (3) la difficulté d'utilisation de plusieurs de ces outils et (4) la difficulté d'interprétation des solutions.

1.2.3.2 Le *Location Based Management System*(LBMS)

Le principal objectif de la gestion de la construction par emplacement de travail (LBMS) est d'assurer que l'exécution des tâches se fasse dans un flux continu (Kenley & Seppänen, 2010; Olivieri *et al.*, 2018). L'avantage d'un échancier utilisant le LBMS est d'avoir une

représentation claire de la séquence des travaux, de visualiser les secteurs disponibles sur le chantier et d'observer directement l'effet des déviations sur l'avancement des travaux. Ainsi, combiné à un processus de contrôle efficace (Seppänen, Evinger & Mouflard, 2014) et au *Last-Planner System*, le LBMS permet de mieux suivre et d'améliorer le flux des travaux, comparativement aux CPM (Dave, Seppänen & Modrich, 2016).

Le LBMS demande dans un premier temps de diviser le projet en secteur et d'établir une structure de découpage pour les secteurs, ou *Location Breakdown Structure* (LBS). Kenley & Seppänen (2010) proposent un découpage à trois (3) niveaux, où le niveau le plus élevé correspond au bâtiment dans son ensemble, le niveau du milieu est pour assurer un flux continu des travaux jusqu'à sa finition (ex. : étage) et le dernier niveau est pour des secteurs individuels où une seule équipe de travail peut effectuer des travaux.

Ainsi, en observant les équipes de travail évoluer à travers des différents secteurs du chantier, l'accent ne se porte plus sur le «chemin critique», il est plutôt porté sur la protection de l'efficacité de production (Kenley & Seppänen, 2010; Olivieri *et al.*, 2018). Le réseau prend en compte deux types de logique : i) la logique externe, pour faire les liens entre les activités qui se succèdent dans un secteur et ii) la logique interne qui permet de calculer la durée d'une activité en se basant sur les quantités et le taux de production. Cela facilite l'optimisation de l'échéancier qui se fait en utilisant les outils suivants (dans l'ordre) : i) changer le taux de production en modifiant des ressources disponibles, ii) changer le taux de production en modifiant l'ampleur des travaux, iii) changer la séquence d'emplacement, iv) changer la séquence d'équipe et v) diviser les tâches (Kenley & Seppänen, 2010).

1.2.3.3 Le Takt-Time Planning (TTP)

Adapté du *Lean Manufacturing*, le Takt-Time planning (Frandsen, Berghede & Tommelein, 2014; Frandsen & Tommelein, 2014) est utilisé pour améliorer la cadence de production sur les chantiers. Le TTP est une méthode pour structurer le travail, c'est-à-dire que le projet dans son ensemble est divisé en plus petits «morceaux» afin qu'ils deviennent plus faciles à gérer

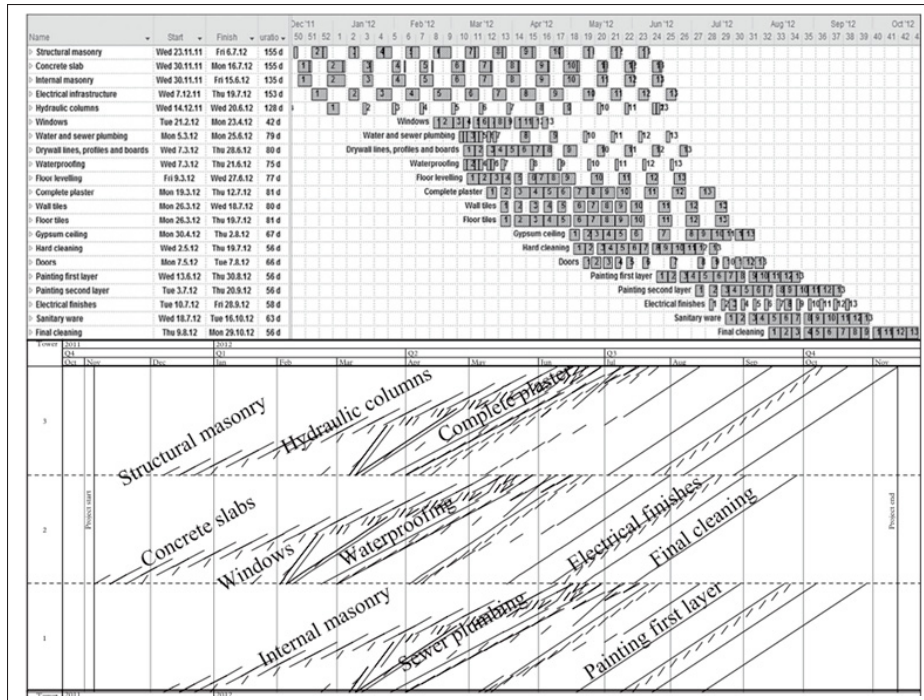


FIGURE 1.10 Exemple de LBMS. Tirée de Olivieri *et al.* (2018)

(Tommelein, 2017). Lors de l'élaboration de l'échéancier de construction, une unité de temps (nommé *Takt*) est déterminée. Chaque spécialité travaillant sur le chantier se voit allouer un ou plusieurs *Takt* pour exécuter leurs travaux dans un secteur donné. Par la suite, une fois le *Takt* terminé, l'équipe passe au prochain secteur, laissant la place libre pour l'équipe suivante (Figure 1.11). La séquence d'équipe ainsi créée permet de régulariser le flux de travail sur le chantier (Frandsen *et al.*, 2014). Ce système est bien adapté pour la construction d'éléments répétitifs, tels que des condominiums et des hôtels (Frandsen & Tommelein, 2014). Bien que son application sur des projets de nature non répétitive peut être faisable et bénéfique, il existe un risque lié à l'incapacité de définir des secteurs contenant des quantités de travail identiques, ce qui peut créer de l'instabilité dans le flux de travail (Linnik, Berghede & Ballard, 2013). Cependant, une approche collaborative peut être une solution afin de permettre l'application du TTP sur un chantier de nature non répétitive (Tommelein, 2017). L'utilisation du TTP peut également se faire en concordance avec le LPS, en venant compléter ce dernier. En effet,

de nature variée et en simplifiant la gestion du site tout en utilisant l'espace visuel le plus efficacement possible (Francis, 2013).

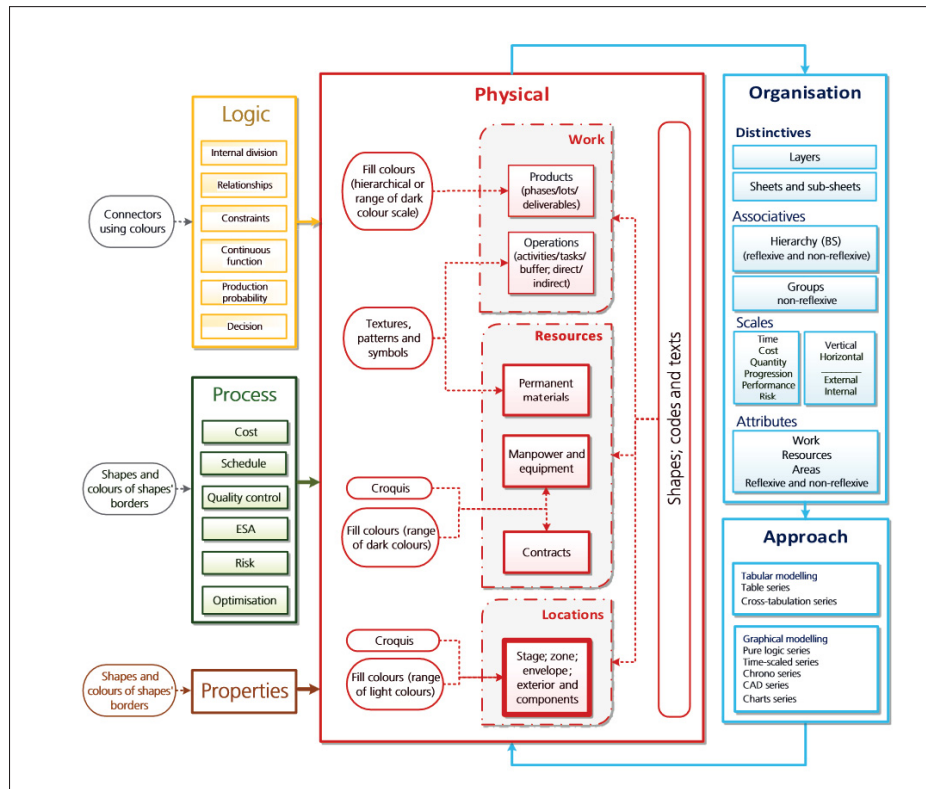


FIGURE 1.12 Protocoles graphiques. Tirée de Francis (2016)

Pour calculer un échéancier d'exécution aussi fidèlement que possible en utilisant la théorie du chemin critique, la Méthode Chronographique (Francis, 2004, 2017a,b; Francis & Miresco, 2002, 2006) divise les activités en sections internes basées sur les quantités (ou la durée) et introduit le concept des liens point à points (Figure 1.13) ainsi que des fonctions dynamiques. Ces fonctions gèrent les interdépendances entre les activités, ajoutent de la flexibilité dans les relations et introduisent les contraintes de suivi d'avancement avec une distinction entre les échelles internes et externes. Cela a mené à une redéfinition des calculs des marges et des chemins critiques en correspondance avec la réalité des chantiers et plus adaptée aux besoins de différents intervenants.

Pour sa part, la Modélisation Chronographique est une représentation spatiotemporelle, telle que décrite dans la section 1.2.1, pour modéliser des planifications mieux adaptées au domaine de la construction (Francis & Miresco, 2006). Son principal attrait repose sur sa capacité graphique pour la présentation des informations utiles pour la gestion des projets de constructions. Depuis son cadre conceptuel et son protocole graphique (Ardila & Francis, 2015a,b), il découle une série de modélisations tabulaires et graphiques générant des affichages adaptés aux différents types de projets, aux diverses spécialités et à l'ensemble des situations pouvant survenir durant un projet de construction (Figure 1.12).

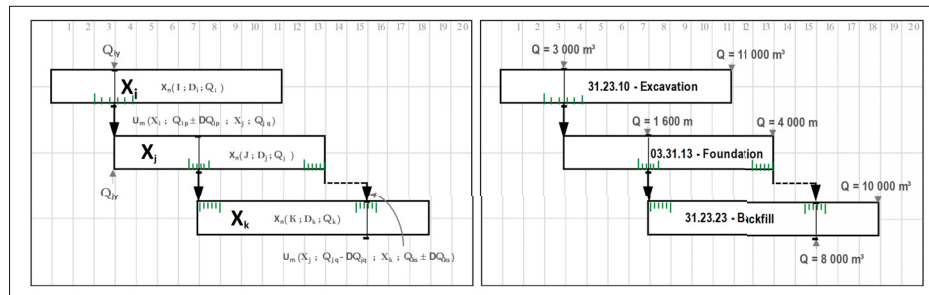


FIGURE 1.13 Contraintes internes entre les activités. Tirée de Francis (2017a)

Les échéanciers spatiotemporels sont conçus spécifiquement pour répondre aux besoins de chaque intervenant d'un projet de construction, adaptant la visualisation pour faciliter le suivi du projet en affichant les bonnes informations, de façon claire et précise (Francis, 2013; Francis & Morin-Pepin, 2017)

Le modèle spatiotemporel du site « *Site-Spatial-Temporal* » (Figure 1.14), représente la mise en œuvre du calendrier sur le plan de site du projet. Le site est divisé en zones en fonction de l'étape de construction. Pour chaque zone, un calendrier est établi pour démontrer la période durant laquelle les activités sont réalisées. Pour faciliter la visualisation et l'interprétation de l'échéancier, deux gammes de couleurs distinctes sont utilisées. Une gamme de couleurs claires pour les espaces et une gamme de couleurs foncées pour les équipes.

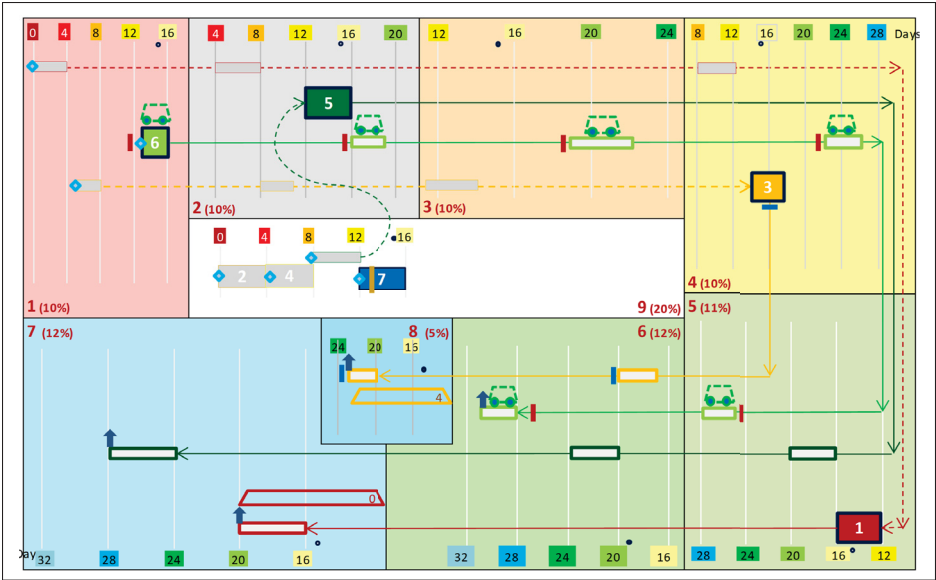


FIGURE 1.14 Modélisation Chrono-Task. Tirée de Francis (2020)

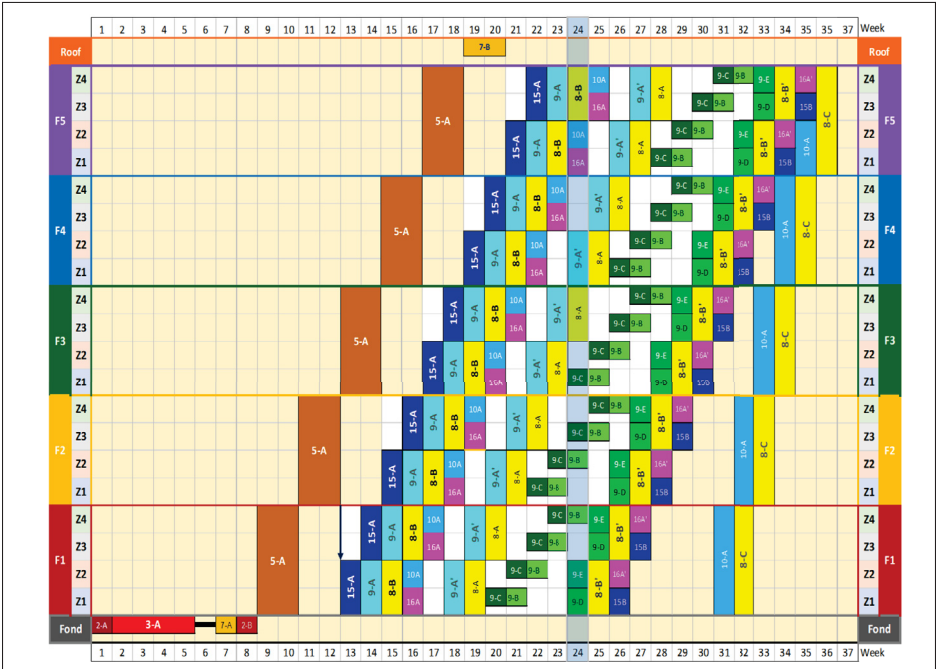


FIGURE 1.15 Planification répétitive groupée par les secteurs. Tirée de Francis (2020)

Les concepts du Space Planning se voient particulièrement utiles dans le cadre de l’affichage de l’allocation des équipes dans les secteurs (Figure 1.15). Cette représentation affiche la rotation des équipes sur les étages et les secteurs. Elle assure en même temps une linéarité de production et une optimisation d’utilisation du site, tout en évitant les encombrements et les relaxations du chantier. Une représentation qui offre une plateforme idéale pour le calcul des taux d’occupation des projets (Francis & Miresco, 2016).

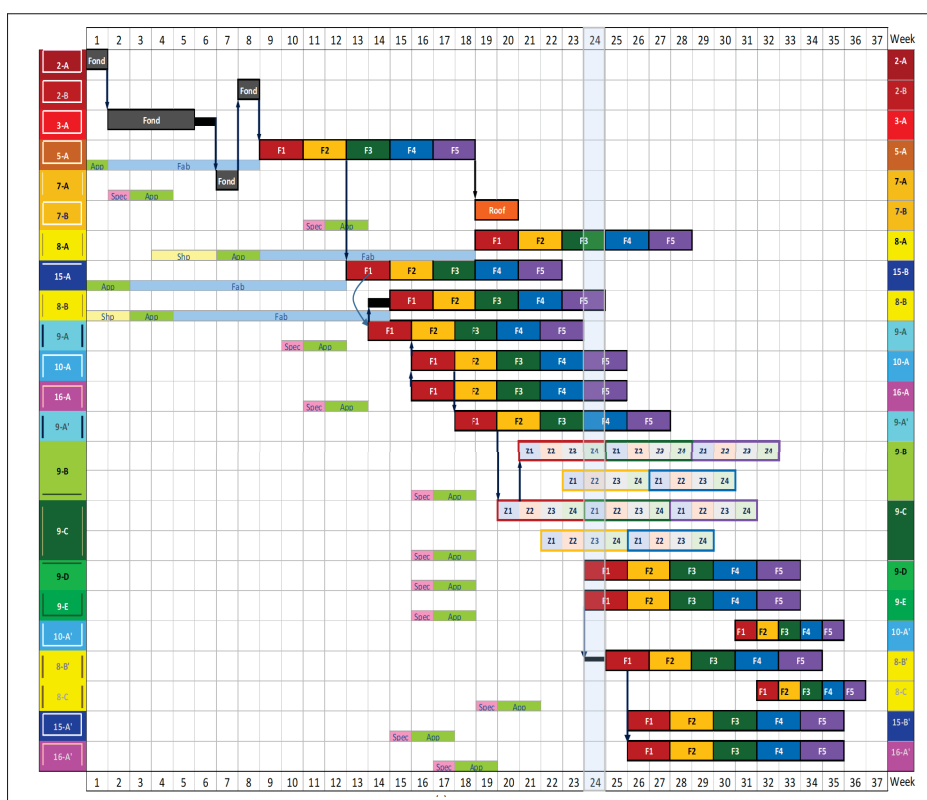


FIGURE 1.16 Regroupement par équipe. Tirée de Francis (2020)

Par la suite, l’affichage Chrono-allocation (Figure 1.16) propose un regroupement par équipes de travail. Une représentation graphique, orientée sur la gestion des ressources, qui démontre l’occupation des équipes et le processus d’approvisionnement des matériaux (Francis & Morin-Pepin, 2017).

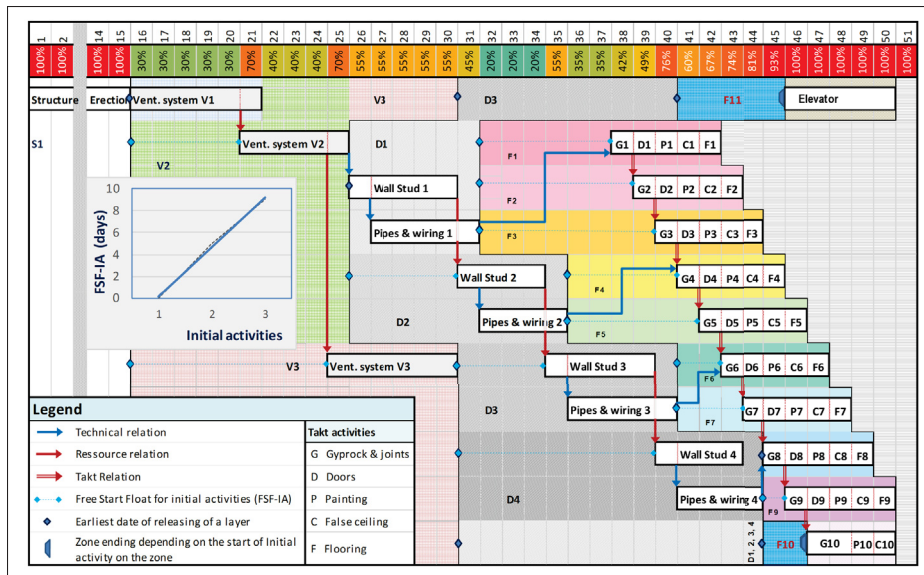


FIGURE 1.17 Optimisation de la Planification spatiotemporelle. Tirée de Francis (2019)

Basée sur des techniques graphiques, procédurales et algorithmiques, l'approche spatiotemporelle, favorise une continuité d'utilisation des espaces en maximisant les taux d'occupation du site. Elle assure aussi la continuité des travaux à travers une production linéaire pour une même équipe et des linéarités parallèles entre les différentes équipes successeurs. Cette approche d'optimisation hybride utilise une modélisation graphique montrant les opérations de construction en avant-plan et les espaces du site en arrière-plan (Figure 1.17).

Les bâtiments à plusieurs étages partagent de nombreux composants et activités communs. Il est donc envisageable de penser à établir une standardisation. En utilisant les données de nombreuses études, la Modélisation chronographique a créé une cartographie standardisée (Figure 1.18). Le but est de créer des systèmes automatisés pour soutenir la construction des échéanciers validés de construction pour ces types de bâtiments.

1.3 4D et visualisation l'échelle du temps

Comme mentionné dans la section 1.1, une des principales difficultés des méthodes de planification traditionnelles pour la planification des projets de bâtiments, tels que les CPM et le

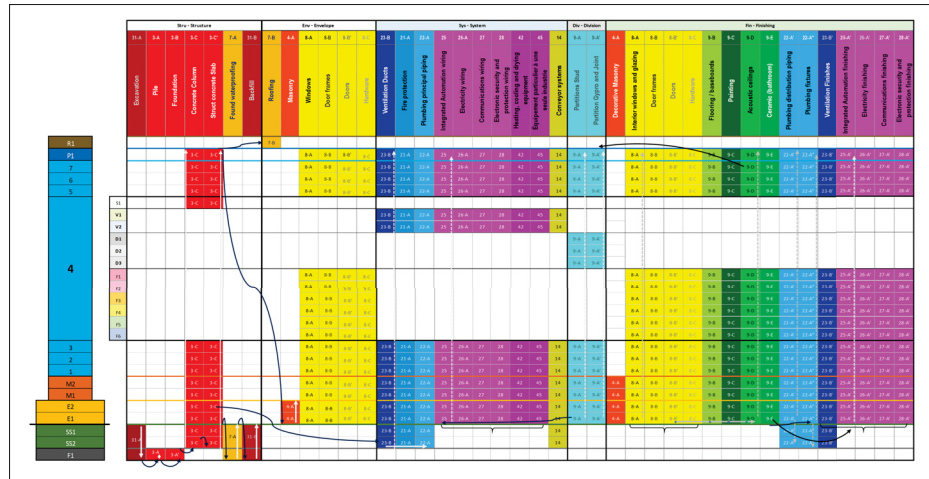


FIGURE 1.18 Cartographie standardisée. Tirée de Francis (2020)

diagramme de Gantt, est liée à leurs processus de modélisation, c'est-à-dire à se concentrer sur les activités et leurs contraintes. Leur incapacité de proprement modéliser les espaces du chantier, la rotation des équipes, les flux d'approvisionnement et de la circulation des matériaux limitent leur capacité d'optimisation des travaux avant et durant la phase de la construction du projet. Les avancements technologiques des deux (2) dernières décennies, principalement au niveau de la modélisation 3D et du BIM, on permet aux chercheurs de proposer et de développer des solutions permettant de remédier à ces problèmes. Ainsi, lier l'échéancier de construction au modèle 3D offre plusieurs opportunités pour analyser la planification sous différentes perspectives.

Akinci & Fischer (2000) ont soulevé que la majorité des entrepreneurs spécialisés connaissent l'espace dont ils auront besoin pour les travaux à venir. Cependant, il n'existe aucun système qui permet à l'entrepreneur général de collecter ces informations et de les intégrer dans la planification des travaux, ils ne peuvent donc pas tenir compte de leurs besoins spatiotemporels lors de la conception de l'échéancier de construction. Afin de remédier à ce problème, ils ont discuté d'un modèle générique qui permettrait de collecter les informations spatiotemporelles des méthodes de travail des entrepreneurs spécialisés. Selon Akinci & Fischer (2000), un tel modèle offrirait deux (2) avantages : i) étudier l'espace requis pour chaque méthode de travail et ii) la possibilité de réutiliser ces mêmes informations spatiotemporelles pour toutes les activités

qui utilisent les mêmes méthodes de travail. Pour ce faire, ils ont déterminé que chaque méthode de travail possédait quatre (4) types d'espace (Akinci & Fischer, 2000) :

1. Espace de travail : Espace requis par les travailleurs pour l'exécution des travaux.
2. Espace pour l'équipement : Espace requis pour la machinerie et les outils requis pour les travaux.
3. Espace de sécurité : Espace ne pouvant pas être utilisé en raison du danger créé par les travaux.
4. Espace de protection : Espace requis pour la protection temporaire des items installés.

Ces informations spatiotemporelles, spécifiques à chaque projet, doivent ensuite être représentées dans l'espace et le temps afin que les gestionnaires de projets puissent les interpréter (Akinci, Fischer & Kunz, 2002a). Cependant, Akinci *et al.* (2002a) soulèvent qu'il serait trop fastidieux pour les gestionnaires de projets de représenter manuellement ces informations dans le modèle 4D. Basés sur ce besoin, ils ont conçu un processus automatisé pour représenter les informations spatiotemporelles, identifiées dans la liste ci-dessus, sur la maquette CAD-3D du projet (Akinci *et al.*, 2002a).

En développant le *4D Management for Construction Planning and Resource Utilization* (4DMCPRU), Wang, Zhang, Chau & Anson (2004) ont cherché à étendre l'utilité sur les modèles 4D en y ajoutant la gestion des ressources et la planification dynamique de l'aménagement du chantier. Dans la plateforme qu'ils ont développée, les ressources nécessaires pour l'exécution des activités sont renseignées, et ensuite, le modèle 4D pour la gestion du site est généré en liant l'échéancier de construction au modèle 3D du bâtiment (Wang *et al.*, 2004). Chau, Anson & Zhang (2005) ont également remarqué qu'à elle seule, une maquette 3D a une utilité limitée pour un gestionnaire de chantier, il manquait un système intégré qui permettait de lier l'échéancier au modèle 3D. Ils ont donc développé le *4D Site Management Model into the Platform* (4D-GCPSU) qui fournit une plateforme informationnelle dynamique qui permet de joindre le modèle 3D d'un bâtiment à l'échéancier de construction au travers du WBS (figure 1.19). Cette plateforme permet donc de faire une analyse et un suivi spatiotemporel 4D

des ressources et de l'aménagement du chantier, fournissant ainsi l'assistance nécessaire aux gestionnaires de projets pour suivre efficacement l'état du chantier (Chau *et al.*, 2005).

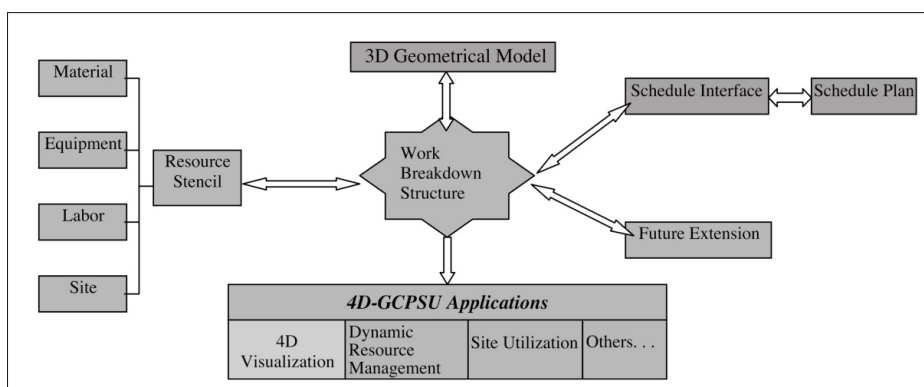


FIGURE 1.19 Structure du 4D-GCPSU. Tirée de Chau *et al.* (2005)

Jongeling & Olofsson (2007) soulèvent que l'utilisation de la planification par emplacement de travail pourrait être bénéfique aux modèles 4D-CAD afin d'offrir une alternative intéressante à la planification traditionnelle basée sur les activités. En effet, un modèle 4D-CAD aurait la capacité de rehausser la valeur de la planification par emplacement de travail en améliorant le flux des travaux et en réduisant le gaspillage durant la construction (Jongeling & Olofsson, 2007). Bien que la planification par emplacement de travail offre de nombreux avantages, la majorité des entrepreneurs dans la construction utilise toujours les méthodes de planification traditionnelles (Gantt), Chavada, Kassem, Dawood & Naji (2012) ont donc développé une plateforme qui intègre la gestion de l'aménagement du chantier et la planification traditionnelle à un modèle BIM. L'utilisation du moteur graphique *A Serious Game Engine* leur a permis de gérer les espaces de travail et visualiser la planification 4D en temps réel. Cependant, Li, Chan, Skitmore & Huang (2015) ont remarqué que le montage d'une simulation 4D est une tâche complexe qui est généralement effectuée par des utilisateurs d'expérience. En utilisant un moteur graphique de jeux vidéo, ils ont développé une plateforme simplifiée qui permet aux utilisateurs moins expérimentés de combiner le positionnement des ressources à la planification afin de faciliter le montage de simulation 4D.

Un des principaux intérêts de la modélisation 4D est la possibilité d'utiliser un modèle unique pour conserver et extraire l'ensemble des informations requises pour la planification de la construction. Ainsi, Jongeling, Kim, Fischer, Mourgues & Olofsson (2008) ont démontré l'utilité des analyses quantitatives provenant des modèles 4D-CAD dans la planification des opérations de constructions. Lors de leurs analyses des données provenant du modèle 4D-CAD, ils ont remarqué que i) la distance entre les différents types de travaux avait un effet sur la sécurité et la productivité et ii) qu'il était facile de prévenir les conflits d'espace entre les équipes de travail, que la planification traditionnelle comme le CPM et le diagramme de Gantt ne peuvent pas faire (Jongeling *et al.*, 2008). Cependant, dans le cadre de leurs recherches, Kassem, Dawood & Chavada (2015) ont remarqué que les outils de planification 4D ne permettaient pas de faire la gestion et la planification de l'aménagement du chantier. Ils ont ainsi soulevé plusieurs limitations dans les recherches antérieures : i) elles utilisent des outils 4D traditionnels (ex. : 4D-CAD), ce qui limite la centralisation de l'information et sa communication au gestionnaire, ii) les outils de gestion de l'aménagement des chantiers n'utilisent pas l'environnement IFC, limitant ainsi l'interactivité et l'analyse des données avec le modèle BIM et iii) ces études ne couvrent pas de manière holistique et simultanée toutes les informations requises pour la gestion et la planification de l'aménagement du chantier. Afin de régler ces limitations, Kassem *et al.* (2015) ont développé une plateforme BIM 4D, compatible avec le format IFC, dans lequel l'ensemble des informations et des processus requis pour la planification et la gestion de l'aménagement des chantiers y sont intégrés. Ceci permet de lier l'échéancier au modèle 3D du projet. Cette plateforme permet donc de visualiser en temps réel l'évolution dynamique des espaces de travail, augmentant ainsi l'interactivité et la capacité d'analyse du modèle BIM 4D (Kassem *et al.*, 2015).

Un élément important concernant la planification par emplacement de travail et l'aménagement du chantier est la capacité d'obtenir les dimensions des différents secteurs du chantier. Généralement, les gestionnaires obtiennent ces informations manuellement ou de façon subjective (Kim & Cho, 2015). Afin de contrer cette limitation, Kim & Cho (2015) ont proposé une approche qui

permettait d'obtenir automatiquement les informations géométriques du modèle afin qu'elles puissent être utilisées comme intrant lors de la planification de la construction.

Un autre objectif, souvent recherché dans la littérature, est d'utiliser la planification par l'emplacement de travail et l'aménagement du chantier pour prédire et conserver une distance sécuritaire entre les équipes de travail. Dagan & Isaac (2015) ont donc développé une méthodologie qui permet de faire une planification dynamique du positionnement et du déplacement des travailleurs sur le chantier. Leur méthodologie utilise un diagramme 3D spatiotemporel pour analyser et, au besoin, ajuster le positionnement des travailleurs afin de prévenir les risques liés aux rapprochements excessifs des travailleurs. Lors de l'utilisation de modélisation 3D pour la planification des emplacements de travail et l'aménagement du chantier, Igwe, Nasiri & Hammad (2020) ont identifié trois (3) lacunes dans les connaissances : i) la première est la représentation des espaces de travail (ainsi que leur représentation dans le temps de manière dynamique) et la résolution de conflits, ii) la deuxième est de définir et standardiser un niveau de détail 4D (4D-LOD) et iii) la troisième est la standardisation du format de fichier BIM.

La capacité analytique de la modélisation 4D a été démontrée à plusieurs reprises dans les publications, mais Su & Cai (2016) mentionnent que, jusqu'à présent, aucune étude ne s'est attardée aux relations topologiques spatiotemporelles entre les différents secteurs. Ils ont donc proposé un système pour formaliser la définition des relations spatiotemporelles entre les activités de construction et ainsi permettre une analyse topologique d'interactions dynamiques des liens entre les différents secteurs sur le chantier (Su & Cai, 2016).

Lier la maquette BIM 3D d'un projet à son échéancier de construction offre de nombreuses possibilités d'analyse aux gestionnaires de la construction en générant une multitude de rapports détaillés (Crowther & Ajayi, 2019). Cela facilite l'optimisation de la phase de construction selon des paramètres spécifiques à chaque projet. Il en demeure qu'en raison du manque de compatibilité entre les logiciels BIM et les logiciels traditionnels de planifications (Mazars & Francis, 2020), la procédure pour les lier est complexe et demande beaucoup d'efforts. Cela est principalement dû au fait que l'échéancier doit être détaillé en fonction des contraintes spatiales du projet,

augmentant grandement le nombre d'activités dans l'échéancier (Mazars & Francis, 2020). Afin de maximiser son efficacité, la modélisation 4D devrait être adoptée le plus tôt possible lors de la préparation et de la planification de la construction, mais les intervenants doivent avoir un certain degré de compréhension de ces outils afin de favoriser leur utilisation (Martins, Evangelista, Hammad, Tam & Haddad, 2020; Crowther & Ajayi, 2019) et certains intervenants pourraient avoir de la difficulté à reconnaître l'utilité de la modélisation 4D tôt dans le processus de planification (Sloot, Heutink & Voordijk, 2019). Selon Crowther & Ajayi (2019), augmenter les formations dans les entreprises serait un bon moyen de sensibiliser les intervenants et de favoriser son utilisation pour les projets de construction. Finalement, les avantages de la modélisation 4D sont bien documentés dans la littérature et la recherche dans le domaine est très active, il est donc fort probable que des solutions à ces limitations soient proposées dans un avenir rapproché.

1.4 Gestion des flux

1.4.1 Les flux de matériaux

Thomas *et al.* (2005) mentionnent qu'une bonne gestion des matériaux sur le chantier est un élément essentiel au bon déroulement de la construction, ils ont donc énuméré une série de principes à respecter (Tableau 1.1) afin de favoriser une bonne gestion des matériaux sur le chantier. Parmi ces principes à respecter, huit (8) sont particulièrement importants afin d'assurer un flux optimal lors des travaux :

1. S'assurer que la séquence des livraisons est compatible avec l'échéancier de construction ;
2. S'assurer que le taux de livraison des fournisseurs est compatible avec le taux d'installation par les équipes de travail ;
3. Les matériaux devraient être stockés afin de permettre un accès facile ;
4. Réserver les secteurs à côté du bâtiment pour les matériaux qui seront utilisés dans les zones de travail ;
5. Maintenir au minimum les matériaux conservés à l'intérieur ;

6. Intégrer la séquence de travail avec le plan de stockage pour que les espaces intérieurs puissent être utilisés sans interférer avec les travaux ;
7. Maintenir le chantier propre ;
8. Retirer les rebuts du bâtiment sur une base régulière.

TABLEAU 1.1 Principe de gestion des matériaux sur un chantier,
extrait de (Thomas *et al.*, 2005)

Number	Principe
1.	Semi-permanent (outside) storage area
1.1	Do not store materials close to the building.
1.2	Locate parking areas, tool sheds, trailers, spoil piles elsewhere or as far from the building as possible.
1.3	Mark stored materials so they can be readily distinguished from similar materials.
1.4	Materials should be stored to permit easy access and retrieval.
1.5	Materials should be stored on timbers or pallets to permit easy retrieval and protected to prevent damage from mud and water
2.	Staging area
2.1	Reserve areas next to the building for materials deliveries or materials being moved to the workface areas.
2.2	Backfill around the building as quickly as is practical to permit the area to be used as a staging area.
3.	Workface (interior) storage area
3.1	The amount of material stored inside should be kept to a minimum.
3.2	Preassemble components into larger components or subassemblies.
3.3	Integrate the sequence of work with the storage plan so interior space can be used without interfering with the work.
3.4	Ancillary tasks like unpacking, cutting, reshaping, preassembly, etc. should be done away from the workface when practical.
3.5	Maintain good housekeeping.
3.6	Arrange for removal of waste from the building on a continuous basis.
4.	Vendor relations and deliveries
4.1	Whenever possible, erect deliveries directly from the delivery trucks.
4.2	Assure deliveries are properly sequenced to be consistent with the work plan.
4.3	Make sure the delivery rate from vendors is compatible with the installation rate of the field crew.
5.	General
5.1	Avoid the use of earthen ramps into below grade areas.
5.2	Make use of elevators.

Plusieurs recherches ont utilisé des algorithmes mathématiques afin d'optimiser les flux des matériaux lors de la construction. Huang, Wong & Tam (2010) ont utilisé la programmation linéaire en nombres mixtes pour optimiser le positionnement intérieur des matériaux par rapport à leurs déplacements horizontaux et verticaux. Huang & Wong (2019) ont formulé un modèle de programmation linéaire par entier mixte binaire, *Binary Mixed-Integer Linear Programming*, pour optimiser les temps de déplacement verticaux des matériaux par les appareils de levage. Le modèle optimise le positionnement des matériaux en fonction du temps et des coûts de déplacement. Avec l'intégration de la notion des frais en fonction du temps supplémentaire, le modèle permet d'estimer efficacement les frais d'entreposage et de

déplacement des matériaux. Golpîra (2020) a développé une plateforme qui permet d'optimiser la chaîne d'approvisionnement de plusieurs chantiers et qui intègre l'approvisionnement depuis plusieurs fournisseurs de matériaux. Pour leurs plateformes, ils ont formulé un modèle de programmation linéaire par entier mixte, *Mixed Integer Linear Programming*, qui incorpore les stratégies des fournisseurs afin d'optimiser la commande et la livraison de divers matériaux sur plusieurs chantiers. En sélectionnant automatiquement le fournisseur de matériaux, la plateforme permet d'éliminer une couche de décision, facilitant ainsi l'échange d'informations et réduisant les délais.

Les algorithmes génétiques ont également été très utilisés afin d'étudier de nombreux problèmes liés aux flux des matériaux, notamment le positionnement des matériaux au sol à l'extérieur par rapport à la grue à tour (Tam, Tong & Chan, 2001), l'optimisation des positionnements des matériaux sur les étages d'un projet multiétages (Jang, Lee & Choi, 2007), l'optimisation du positionnement intérieur des matériaux par rapport aux équipements de levage (Fung, W. H., Wong, Tam & Tong, 2008) et l'optimisation du positionnement et des déplacements des matières dangereuses sur les chantiers (Xu, Zhao, Li & Zeng, 2016).

Li, Luo & Skibniewski (2019) ont, de leur côté, développé le *Construction Component Storage Area Planning (CCSAP)* qui effectue une optimisation dynamique du positionnement des matériaux sur le chantier. Le CCSAP utilise le BIM pour générer une liste des matériaux qui seront requis. Par la suite, un système de traitement d'images et de vidéos analyse l'état du chantier et identifie l'espace disponible. Finalement, un algorithme génétique optimise le positionnement des matériaux obtenu du modèle BIM dans les espaces identifiés sur les photos et les vidéos. Bakchan, Faust & Leite (2019) ont développé une plateforme qui utilise les capacités de relevé des quantités du BIM pour estimer automatiquement la quantité de rebuts générés lors de la construction.

D'autres chercheurs ont utilisé les systèmes d'informations géographiques ou SIG dans la gestion des flux des matériaux. Les SIG sont des systèmes d'information conçus pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques.

Cheng & Yang (2001) ont étudié la possibilité d'utiliser ces systèmes pour relever les quantités afin d'estimer les coûts et d'automatiser la planification du positionnement des matériaux sur le chantier. Su *et al.* (2012) ont mentionné que la gestion de l'espace lors des projets de rénovation était différente que pour les projets de constructions neuves. Ils ont donc développé le *Material Layout Evaluation Model* (MLEM) qui évalue quantitativement le positionnement des ressources lors d'un projet de rénovation. Ils ont implanté un algorithme sur un système d'information géographique afin d'automatiser la collecte d'informations pour les utilisateurs, la liste des matériaux requis, les délais de livraisons et de collectes, les distances de déplacement les plus courtes et la qualité totale de l'aménagement du projet. Ebrahimi, AbouRizk, Fernando & Mohamed (2011) ont développé une procédure qui permet de simuler un processus de construction qui présente en détail la chaîne d'approvisionnement d'un projet de construction. Cela leur a permis de démontrer l'importance de l'approvisionnement lors de la planification du processus de construction.

1.4.2 Les flux d'équipes de travail

Comme discuté dans les sections 1.1.1.2 et 1.2.1, la planification linéaire et par emplacement de travail présente des alternatives à la planification standard utilisant les réseaux CPM. El-Rayes (2001) et Bonnal, Gourc, Hameri & Lacoste (2005) ont développé une méthodologie de planification basée sur les LOB qui intègre les trois (3) critères pratiques suivants : i) la planification basée sur les ressources d'activités répétitives (El-Rayes & Moselhi, 1998), l'optimisation de la planification de projet de construction répétitif (Moselhi & El-Rayes, 1993) et iii) l'intégration de techniques de planification pour des tâches répétitives et non répétitives. Olivieri *et al.* (2018) ont donc validé les capacités du *Location-Based Management System* (LBMS) (voir section 1.2.3.2) pour améliorer le flux de travail sur les chantiers et favoriser une utilisation continue des ressources sans affecter la durée totale des travaux.

Varghese & O'Connor (1995) ont utilisé les systèmes d'information géographiques et les systèmes experts, afin d'automatiser la planification du déplacement des véhicules lourds sur de gros chantiers industriels. Dong, Ge, Fischer & Haddad (2012) ont utilisé les algorithmes

génétiques pour automatiser la planification anticipée, le *Look-Ahead Scheduling*, pour la phase de finition de projet de construction complexe. En plus des contraintes standards utilisées lors de la planification, leur méthodologie intègre trois (3) nouvelles contraintes : i) les priorités d'ingénierie ii) les contraintes de blocage et iii) les contraintes de secteurs.

Chen, Griffis, Chen & Chang (2012) ont développé le *Intelligent Scheduling System (ISS)* qui combine les simulations par ordinateur aux techniques analytiques afin de répondre aux quatre (4) questions suivantes en fonction des objectifs du projet : i) Quelle est la distribution de ressources quasi optimale pour chaque activité ? ii) Quelle est la distribution de l'espace quasi optimale requise par les ressources ?, iii) Quelle est la probabilité de respecter les objectifs du projet ? et iv) Quels sont les impacts sur l'échéancier des événements imprévus ?

1.4.3 Les flux spatiotemporels

Ayant déjà développé des systèmes permettant d'automatiser la planification dynamique des aménagements de chantier (section 1.2.3.1), Zouein & Tommelein (2001) ont utilisé leurs connaissances des algorithmes mathématiques afin de résoudre les conflits spatiaux lors de la planification des travaux. L'algorithme heuristique développé peut déplacer des activités si le secteur est disponible. Il peut varier la quantité de ressources selon le besoin d'espace de chaque activité dans un objectif de minimisation de la durée totale du projet.

Mallasi (2009) a utilisé les algorithmes génétiques pour résoudre les conflits spatiotemporels à l'intérieur d'un bâtiment en construction. L'objectif est de conscientiser les gestionnaires de projets aux besoins d'espaces pour les différentes équipes de travail. Moon, Kim, Kim & Kang (2014) ont utilisé les algorithmes génétiques pour minimiser la durée du projet et les interférences entre les équipes. Une simulation BIM est ensuite générée afin de représenter ces interférences au gestionnaire. Finalement, Isaac *et al.* (2017) ont utilisé les fonctions singulières pour planifier les activités qui ont lieu en parallèle dans des secteurs différents tout en maintenant une distance sécuritaire entre chaque équipe.

Tao, Wu, Sheng & Wang (2018) ont développé un modèle qui se concentre sur les projets à caractère répétitif dans lequel la programmation à entier mixte multicritère est utilisée pour résoudre les trois (3) objectifs du modèle, soit : i) la durée totale du projet, ii) le coût et iii) le taux de congestion. Kim & Kim (2010) ont effectué une simulation multi-agents d'un projet de grande envergure afin d'évaluer l'effet du flux de la machinerie. Lors de leurs simulations, ils ont constaté que le flux des équipements de construction pouvait avoir un impact significatif sur l'efficacité du projet. Wu & García de Soto (2020) ont développé et validé une modélisation spatiotemporelle des activités de levage. Leur modélisation était constituée de deux (2) parties : i) un modèle de planification et d'optimisation des tâches de levage qui prend en compte la préparation des matériaux, leurs déplacements et ii) l'affichage des tâches de levages en utilisant une simulation 4D.

Bascoul, Tommelein & Douthett (2020) ont soulevé que la planification de projets de construction, en utilisant les méthodes traditionnelles telles que le CPM et le Gantt, favorisait la séparation des activités afin qu'elles puissent être effectuées en parallèle. Cependant, cela augmente la densité des travailleurs, augmentant ainsi les risques de conflits d'espaces. Ils ont donc développé le *LoSite*, un modèle qui aide les gestionnaires à visualiser les travaux effectués équipe par équipe et emplacement par emplacement. Wu & de Soto (2021) ont utilisé le moteur graphique *A Serious Engine* afin de faire une simulation spatiotemporelle du déplacement des ascenseurs lors de la construction d'un bâtiment multiétages.

1.5 Détection des congestions et des conflits

Akinci, Fischer, Levitt & Carlson (2002b) ont cherché à formaliser l'analyse des conflits spatiotemporels et de développer une procédure permettant de les classer et de les prioriser. L'analyse de ces conflits est effectuée en quatre (4) étapes (Figure 1.20) : i) détection des conflits dans le modèle de production, ii) agrégation des conflits, iii) catégorisation des conflits agrégés et iv) priorisation des conflits agrégés. Cette formalisation a ensuite été intégrée dans un système prototype, le « 4D WorkPlanner Time-Space Conflict Analyzer (4D TSConAn) ».

L'utilisation d'un environnement 4D leur a permis de calculer le ConflictRatio (Équation 1.6), qui est similaire au *Space Capacity Factor* (Équation 1.4) de Thabet & Beliveau (1994).

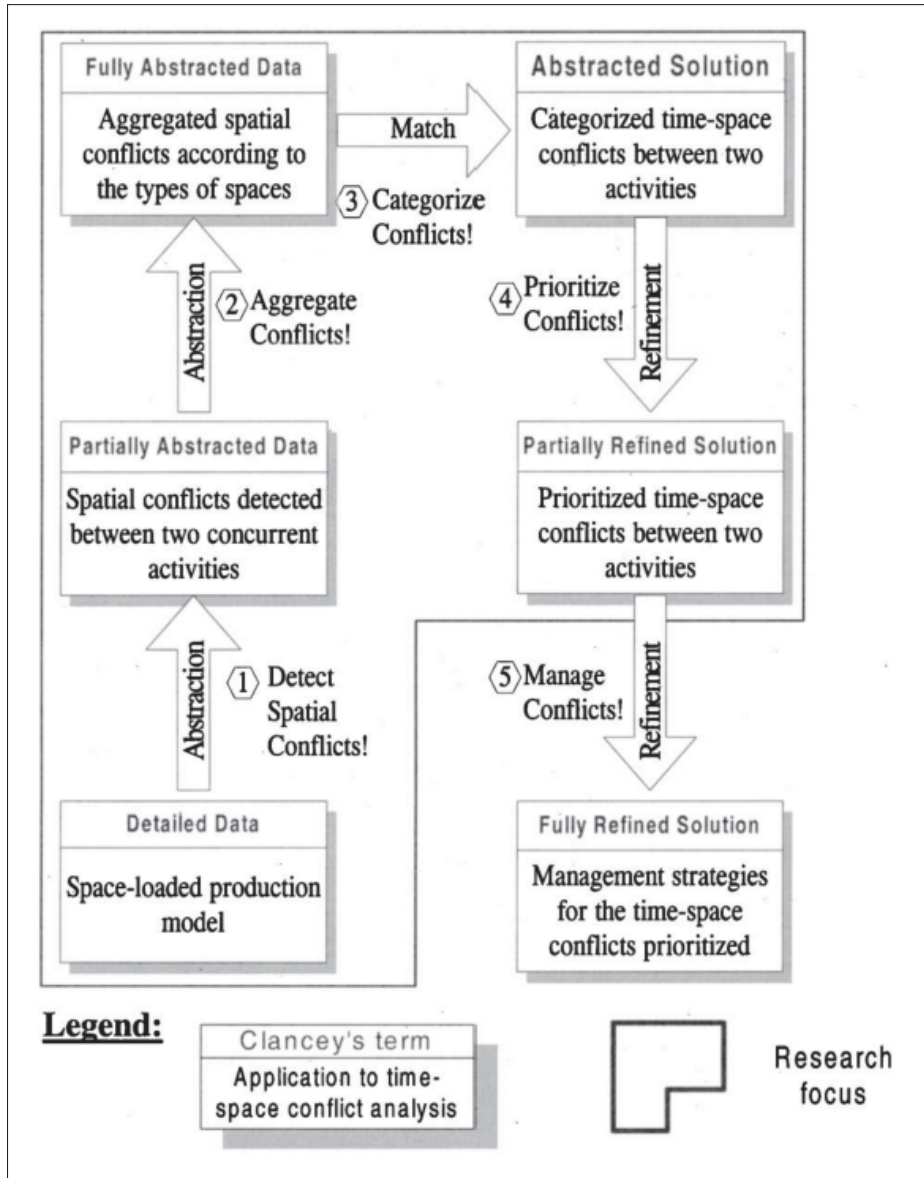


FIGURE 1.20 Formalisation de l'analyse des conflits spatiotemporels. Tirée de (Akinci *et al.*, 2002b)

$$ConflictRatio = \frac{\sum ConflictingVolume}{\sum VolumeofSpaceRequired} \times 100\% \quad (1.6)$$

Tirée de (Akinci *et al.*, 2002b)

Guo (2002) a combiné MS Project et AutoCAD pour développer un processus de détection et de résolution des conflits d'espace sur le chantier (Figure 1.21). Selon eux, ce système CAD permet aux gestionnaires d'indiquer les critères de priorisation afin d'effectuer et de détecter dynamiquement les conflits d'espace provenant de la planification et de proposer une solution sur les plans CAD du projet. Ce système d'aide à la décision permet donc de résoudre ce problème complexe plus efficacement et avec plus de précision.

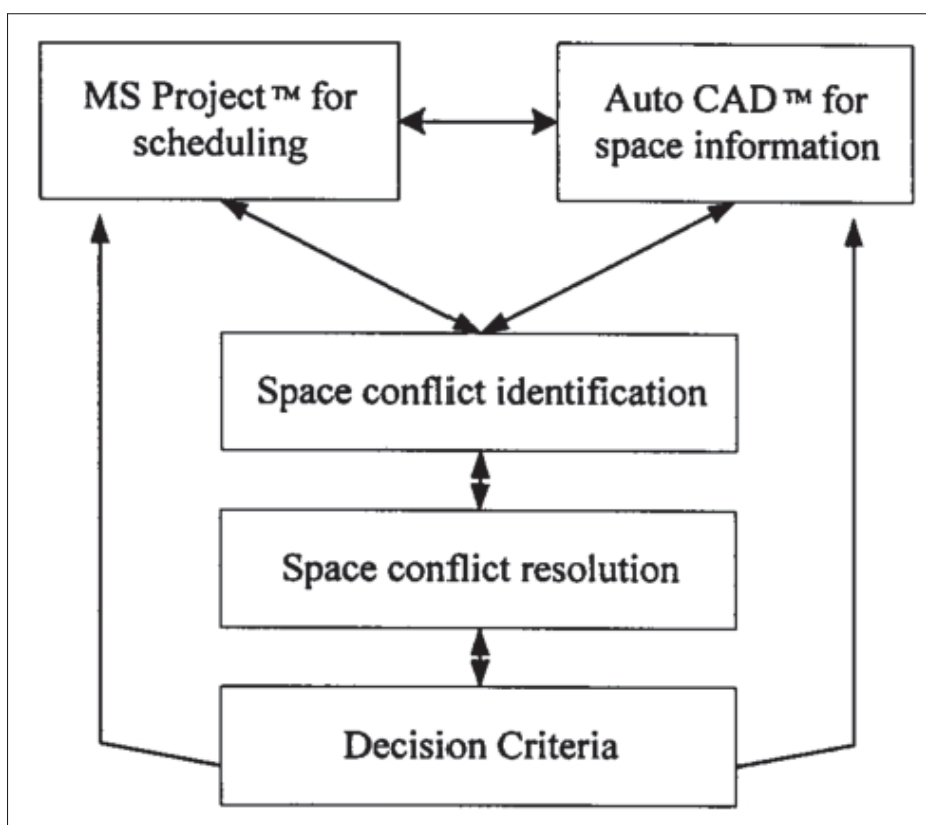


FIGURE 1.21 Structure du système de résolution de conflits d'espace. Tirée de (Guo, 2002)

Mallasi (2006) a soulevé quatre (4) problèmes spécifiques dans la planification spatiotemporelle : i) la représentation de la stratégie d'exécution, ii) la simulation de l'état d'avancement de la construction, iii) la planification des espaces de travail en trois dimensions et iv) l'analyse des connexions spatiotemporelles. Il a développé le *Critical Space–Time Analysis (CSA)*, qui est un mécanisme de raisonnement qui permet de minimiser la criticité des conflits spatiotemporels. Il

a introduit le concept de « compétition entre les espaces de travail », *Workspace Competition*, afin de minimiser la congestion entre les activités. L'évaluation du CSA se fait avec l'aide de PECASO, une application prototype qui utilise une fonction multicritère pour évaluer la sévérité des conflits. L'objectif de son approche PECASO-CSA est de sensibiliser les gestionnaires à la planification spatiotemporelle et d'améliorer leur confiance lors de l'utilisation des simulations 4D afin de communiquer l'échéancier de construction.

Chua, Yeoh & Song (2010) ont proposé une méthodologie qui fait la distinction entre plusieurs classes de conflits (Figure 1.22), ils cherchent principalement à montrer les liens entre les conflits d'espace et la congestion sur les chantiers. Pour ce faire, ils ont introduit deux (2) indicateurs qui peuvent être utilisés comme complément aux analyses 4D-CAD : i) le « *Dynamic Space Interference* » (*DSI*) qui permet de quantifier les interférences lorsque qu'il y a conflit entre des activités et ii) le « *Congestion Penalty Indicator* » (*CPI*) qui permet d'évaluer, d'analyser et de comparer la faisabilité de plusieurs échéanciers.

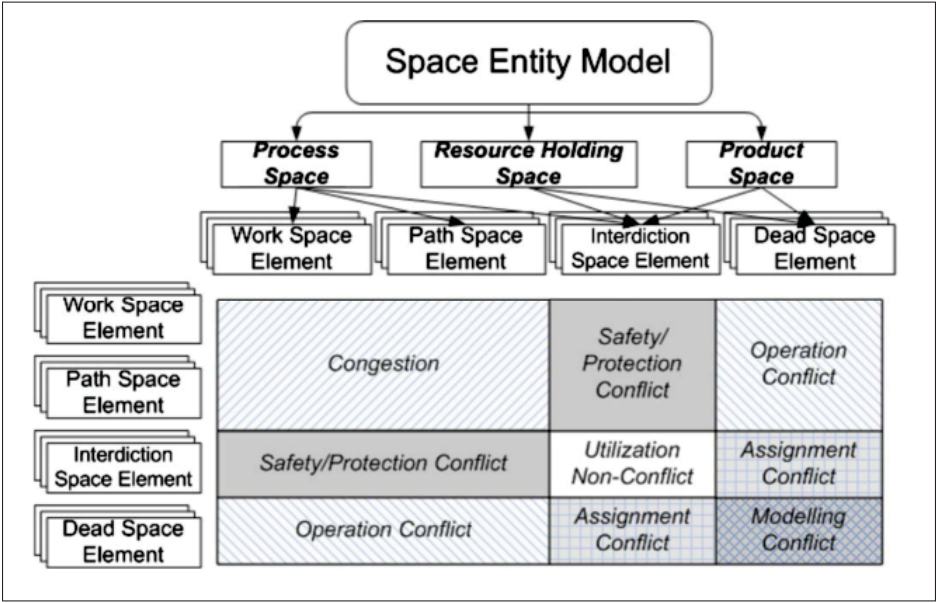


FIGURE 1.22 Détection des type de conflits et de congestion.
Tirée de (Chua *et al.*, 2010)

Bansal (2011) a mentionné que les informations géométriques et sémantiques sont essentielles pour la planification par emplacement de travail. De plus, avoir un modèle 3D du bâtiment avec

ses alentours, de faire une simulation 4D et d'avoir la possibilité de faire des analyses géospatiales dans une seule plateforme peut être un atout important pour concevoir une planification par emplacement travail. Il a donc intégré les SIG aux simulations 4D pour créer un environnement 3D-GIS. Selon l'auteur, cet environnement permet d'identifier et de résoudre les conflits d'espace, de la conception des plans à la planification de la construction, les changements dans la planification sont ensuite effectués dans l'environnement 3D-GIS directement.

Said & El-Rayes (2013) ont développé le *Congested Construction Logistics Planning (C2LP)*, un modèle qui utilise les algorithmes génétiques afin d'optimiser l'utilisation de l'espace intérieur d'un bâtiment en construction. Selon eux, ce modèle aide à minimiser les coûts de logistique tout en minimisant l'impact du stockage des matériaux sur l'échéancier de construction. L'algorithme génétique est utilisé pour optimiser quatre (4) catégories de variables : i) l'achat des matériaux, ii) le plan de stockage des matériaux, iii) le positionnement des installations temporaires et iv) la planification des activités non critiques. Ils ont été en mesure de déterminer des marges sur les équipes de travail et la productivité afin de développer et calculer une nouvelle marge qui permet de mesurer les flexibilités présentes dans la planification par emplacement de travail. Lors d'une recherche ultérieure, Said & Lucko (2016) ont soulevé deux (2) lacunes dans les recherches sur la planification par emplacement. En premier, la notion de marges n'est pas bien définie dans les recherches et, deuxièmement, il n'existe aucune mesure permettant de quantifier la disponibilité des espaces de travail.

Mirzaei, Nasirzadeh, Parchami Jalal & Zamani (2018) ont développé une nouvelle approche, qui selon eux, permet de détecter dynamiquement les conflits spatiotemporels. En premier lieu, l'espace de travail des équipes est déterminé par leurs mouvements à l'intérieur des différents secteurs. Par la suite, ces informations sont insérées dans une simulation BIM-4D afin de détecter, calculer et afficher dynamiquement le positionnement et la taille des conflits entre les équipes de travail lors de la construction.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS, MÉTHODOLOGIES ET JUSTIFICATIONS

2.1 Objectif

Cette recherche vise à utiliser les capacités de la Modélisation Chronographique afin de simuler les opérations du chantier. L'objectif principal étant de développer des artefacts visuels standardisés, en se basant sur le *Design Science*, pour représenter et optimiser le flux de travail des opérations de construction sur les chantiers des projets de bâtiments. Le but est de proposer une procédure permettant le calcul spatiotemporel dynamique du taux d'occupation, appelé Planification par modélisation dynamique du taux d'occupation (PMDTO) ou *Dynamic Modelisation of Occupancy Rate Scheduling* (DMORS). Cette procédure ajoute une couche d'informations supplémentaire, le taux d'occupation du chantier, à la Modélisation Chronographique afin d'améliorer la planification et la gestion de l'espace disponible sur le chantier en assurant une utilisation optimale des espaces tout au long de la construction d'un bâtiment. Puisque cette recherche s'adresse principalement à la phase de construction, des approches empirique et pragmatique ont été privilégiées afin d'assurer que la procédure proposée puisse refléter la réalité d'un chantier.

2.2 Méthodologie

La première étape de cette méthodologie était de visiter des chantiers de construction de bâtiments afin de collecter des données sur le positionnement et l'occupation de l'ensemble des ressources présentes directement sur ces chantiers. L'objectif était d'effectuer des relevés hebdomadaires de l'ensemble des chantiers afin de pouvoir étudier l'aspect dynamique de l'occupation. La taille et la périodicité de ces relevés ont fait ressortir la problématique sur les technologies qui doivent être utilisées pour effectuer des relevés réguliers afin d'assurer un suivi d'avancement rigoureux. Ainsi, plusieurs technologies ont été testées et analysées, telles que la prise de photos et de vidéos, l'installation de capteurs spécialisés sur les différents éléments

présents sur le chantier et la génération de nuages de points. Sept (7) critères ont été retenus et priorisés, afin d'évaluer chacune des technologies. Pour chacun de ces critères, un niveau de performance à trois (3) niveaux, i) faible, ii) acceptable et iii) bonne, a été accordé à chacune des technologies évaluées. Leur combinaison a ainsi permis de déterminer les technologies adaptées pour une utilisation par les entrepreneurs désirant appliquer la PMDTO.

La prochaine étape consistait à concevoir et à classer des artefacts normalisés adaptés à l'optimisation dynamique des opérations. L'accent a été mis sur l'amélioration de l'utilisation de l'espace du chantier de construction. Ces artefacts, présentés schématiquement, devaient représenter efficacement et clairement les opérations de construction et l'affectation spatiale des ressources. Pour atteindre cet objectif, la conception des artefacts a suivi la méthode analytique du *Design Science*, présentée par Hevner, March, Park & Ram (2004), à savoir : i) la collecte d'informations et l'analyse statique des opérations de construction et de leurs besoins en espace, ii) les paramètres pour le calcul du taux d'occupation, ou *Occupation Rate* (OR) ; iii) la modélisation des artefacts statiques et le calcul pour représenter graphiquement les différents types d'occupation et d'opération et iv) la validation des artefacts créés dans le cadre d'ateliers auprès de professionnels œuvrant dans le domaine de la construction.

L'étape suivante consistait à développer la Structure de Découpage Dynamique des Secteurs (SDDS), ou le *Dynamic Location Breakdown Structure* (DLBS). Les secteurs présents sur les chantiers varient et évoluent tout au long du processus de construction. Pour cela, les artefacts ont été sujets à l'analyse des aspects dynamiques de la construction. D'abord, un système de couches, représentant les principales étapes de la construction de l'ouvrage, a été développé. Chaque couche contient les secteurs qui seront disponibles lors de cette principale étape de la construction, ainsi que les paramètres liés aux secteurs qui seront requis pour le PMDTO.

Le processus d'analyse et d'optimisation commence dès que le gestionnaire positionne les ressources et les équipes de travail et des ressources dans un secteur, et ce processus se poursuit au fur et à mesure que d'autres types d'occupation, ou *Occupation Type* (OT), sont positionnés. Il est donc nécessaire d'afficher l'information pertinente qui permettra aux gestionnaires de

faire une analyse appropriée du taux d'occupation. Pour ce faire, plusieurs niveaux de taux d'occupation sont nécessaires, en commençant par le calcul d'un taux d'occupation pour chacun des secteurs individuels. Cela a permis un calcul simple et réaliste de l'occupation des zones, des étages et de l'ensemble du chantier de construction par les opérations.

La représentation de l'évolution spatiotemporelle dynamique du taux d'occupation est réalisée grâce à la Modélisation Chronographique, en ajoutant le taux d'occupation comme couche d'information supplémentaire aux différentes représentations de la Modélisation Chronographique. Pour ce faire, une procédure détaillée est proposée, développant des mini artéfacts permettant de représenter les types d'occupation et les taux d'occupation sur le DMORS. Cela ajoute la possibilité d'utiliser cette représentation dynamique du taux d'occupation pour visualiser et identifier les secteurs surutilisés et sous-utilisés au fur et à mesure que le gestionnaire de projet a construit le calendrier du projet. Un processus de validation a finalement été effectué à l'aide d'un exemple de projet. Un atelier de validation a été fait auprès de professionnels du domaine de la construction afin d'obtenir leur opinion sur la représentativité des artéfacts. Comme preuve de concept, une PMDTO a été fait pour ce projet afin de montrer les capacités d'optimisation.

2.3 Résumé des chapitres

Le chapitre 3, *Sélection des technologies pour effectuer les relevés*, dans lequel différentes technologies de collectes de données ont été étudiées et testées afin de déterminer lesquelles seraient adaptées pour effectuer des relevés dans le cadre des projets de construction. L'évaluation des technologies de relevés a été effectuée en utilisant une série de sept (7) critères, classés en ordre de priorités (Morin Pépin & Francis, 2019). Pour chacun de ces critères, un niveau de performance à trois (3) niveaux a été accordé à chacune des technologies évaluées, ce qui a permis de choisir quelles seraient les technologies de relevés les mieux adaptées. L'étude initiale (Morin Pépin & Francis, 2019) ayant été effectuée en 2018, elle devrait être mise à jour avec les avancements technologiques de ces dernières années. Une analyse plus récente et plus approfondie a été effectuée auprès des technologies disponibles en analysant leurs possibles

utilisations et applications par les entrepreneurs sur leurs chantiers, dans le but de soutenir l'utilisation du PMDTO par ceux-ci.

Le chapitre 4, *Modeling and Categorizing Standardized Artifacts for Scheduling Occupancy on Building Construction Sites*, présente l'article Morin Pépin & Francis (2024) dans lequel est détaillé le procédé de collecte lors des relevés, ainsi que le traitement des photos collectées. Le traitement des données collectées lors des relevés a commencé par une analyse qualitative des cinq (5) types de ressources présents sur un chantier : i) les travailleurs, ii) les matériaux, iii) les outils, iv) la machinerie et v) le cycle inversé. Cette analyse qualitative a mené à la création de l'*Occupation Type Breakdown Structure* (OTBS). Cela a permis ensuite de faire une analyse qualitative afin de déterminer comment calculer des espaces occupés et les types d'occupation, ou *Occupation Type* (OT). Les types d'occupation sont majoritairement calculés directement à partir de leur dimensions. Cependant, pour certains type d'occupation, comme pour les équipes de travail, l'espace occupé dépend principalement du secteur dans lequel ils sont positionnés. Il a donc fallu déterminer les paramètres nécessaires au calcul de l'espace occupé, et donc du taux d'occupation, pour les quatre (4) type d'occupation identifiés, soit : i) l'occupation générale, ii) l'entreposage, iii) les opérations et iv) les occupations permanentes. Une première méthode de calcul détaillé utilisant l'ensemble de ces paramètres a été développée. Cette méthode de calcul repose sur la création d'artéfacts spécifiques représentant les différentes situations d'occupation pouvant survenir lors de travaux. Les équations requises au calcul du taux d'occupation peuvent ensuite être produites à partir de ces artéfacts. Cependant, cette méthode requiert un effort d'analyse considérable de la part du gestionnaire afin d'être appliquée. Pour cela, une deuxième méthode simplifiée a été développée, utilisant uniquement le paramètre d'inclusivité. Finalement, en raison de l'importance des artéfacts dans le calcul du taux d'occupation, un atelier de validation a été fait auprès de professionnels du domaine de la construction afin d'obtenir leur opinion sur la représentativité des artéfacts.

Le chapitre 5, *Planning the Evolution of the Sectors of a Construction Project Over Time with the Dynamic Location Breakdown Structure* détaille la méthodologie de création et de gestion dynamique des secteurs qui seront nécessaires à la modélisation du PMDTO. Vu l'aspect

dynamique de la modélisation du taux d'occupation, la gestion des secteurs doit également refléter ce côté dynamique. Il a donc été requis de développer une procédure spécifique, qui étend l'application des travaux de Francis & Morin-Pepin (2017) à l'ensemble du chantier, autant à l'intérieur qu'à l'extérieur. Ainsi, en commençant par les plans de chaque étage, la définition dynamique des secteurs est indiquée par la succession de couches intérieures et extérieures qui est appliquée dans la PMDTO à mesure que ces secteurs sont requis pour le calcul du taux d'occupation. Cela permet par la suite de déterminer leurs paramètres, comme la superficie maximale disponible dans chacun et l'accessibilité.

Finalement, le chapitre 6, *Planning a Construction Project Using Static and Dynamic Occupancy Rate* explique le processus de calcul du taux d'occupation dynamique afin de créer un PMDTO. Ce processus commence par le calcul statique du taux d'occupation d'un secteur, qui peut contenir plusieurs type d'occupation. Ce taux servira de base pour l'ensemble de la procédure de conception du PMDTO. Ainsi, la suite de la procédure sera pour le calcul de le taux d'occupation pour une partie du chantier, donc pour un regroupement de secteurs. Pour cela, le poids de chaque secteur dans ce regroupement devra être déterminé. Cependant, sur un chantier, la congestion sera plus importante dans certains secteurs que dans d'autres. Un facteur d'importance est donc proposé afin d'en tenir compte, ce qui permet de calculer le poids ajusté des secteurs, l'OR de chaque secteur reflétera donc cette importance. La modélisation dynamique de l'OR débutera donc par le calcul de l'OR pour chacune des périodes de l'échéancier. Ainsi, le processus complet de conception du PMDTO est présenté sous forme d'une étude de cas.

2.4 Validation et résultats

Le premier article traite de l'utilisation de technologies de collecte dans le domaine de la construction. Il illustre deux cas : un petit entrepreneur opérant dans le secteur résidentiel et un grand entrepreneur traitant régulièrement des contrats privés et publics. Le choix de la technologie de collecte dépend des priorités spécifiques de chaque entreprise. Pour le petit entrepreneur, l'accès à l'information et le temps de traitement sont cruciaux, car ses ressources sont limitées. Selon l'état actuel des technologies, une combinaison de relevés manuels et de

photos ou vidéos serait une solution efficace. En revanche, pour le grand entrepreneur, la rapidité et la qualité des relevés sont prioritaires pour minimiser l'impact sur les travaux en cours et pour assurer une bonne mise à jour de l'échéancier. Des technologies comme le LiDAR ou la reconstruction 3D RGB-D pourraient convenir, bien que ces technologies aient encore certaines limitations.

Le deuxième article, la validation, consistait à vérifier la représentativité des artéfacts statiques utilisés pour simuler l'occupation des équipes de travail (OT) sur un chantier de construction. Une étude a été menée auprès de 24 professionnels de l'industrie de la construction au Québec. Les participants devaient évaluer la représentativité des artéfacts proposés pour diverses situations sur un chantier, comme l'installation de fenêtres, de systèmes de conduits de ventilation et de murs. Les résultats ont permis de valider les paramètres utilisés pour la conception des artéfacts, tels que leur positionnement et leur inclusivité.

Le troisième article propose une structure de découpage dynamique des secteurs (SDDS), ou *Dynamic Location Breakdown Structure* (DLBS), pour la gestion spatiotemporelle de l'occupation des chantiers. La SDDS permet de planifier dynamiquement les secteurs d'un chantier, en tenant compte des différentes phases de construction. Cette méthodologie aide à optimiser l'utilisation des espaces disponibles, en ajustant les secteurs au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

Enfin, le quatrième article introduit un modèle de Planification par Modélisation Dynamique du Taux d'Occupation (PMDTO). Ce modèle a été testé sur un projet fictif, plus précisément sur les travaux de finition intérieure d'un bâtiment. La PMDTO permet de calculer le taux d'occupation pour chaque secteur, pour chaque niveau et pour l'ensemble du projet, en intégrant les contraintes spatiales et temporelles. L'optimisation du PMDTO passe par la priorisation des types d'occupation et le nivellement du taux d'occupation (OR), afin de garantir une utilisation efficace des ressources et de l'espace sur le chantier.

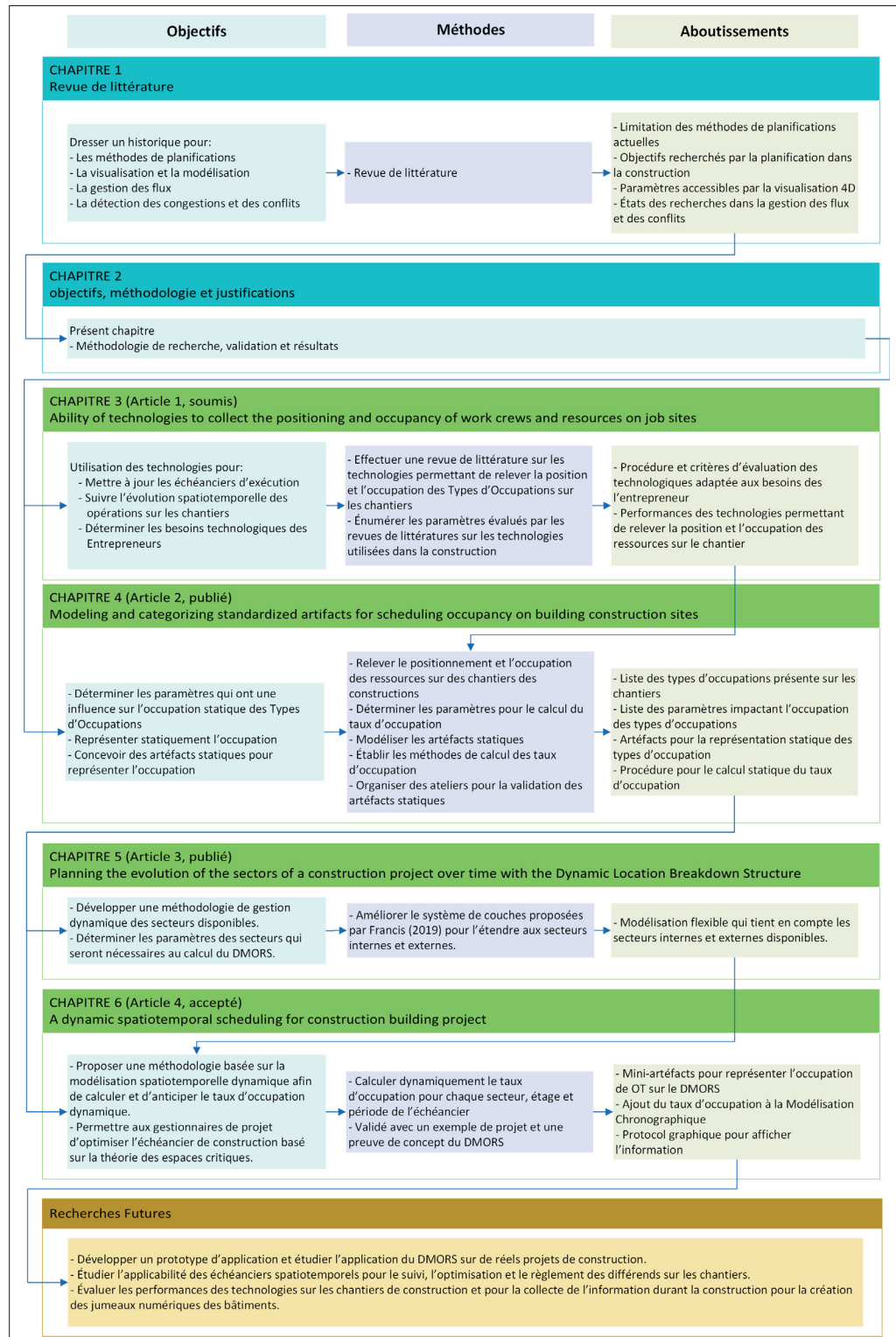


FIGURE 2.1 Structure de l'ensemble de la recherche et de ce document

CHAPITRE 3

ABILITY OF TECHNOLOGIES TO COLLECT THE POSITIONING AND OCCUPANCY OF WORK CREWS AND RESOURCES ON CONSTRUCTION JOB SITES

Stéphane Morin Pépin¹ , Adel Francis¹

¹ Département de génie construction, École de technologie supérieure,
1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis à la revue « Open Civil Engineering Journal » en Novembre 2024.

3.1 Abstract

The efficient updating of construction schedules is critical to project success, especially in managing dynamic workflows. Traditionally, Gantt charts and other linear scheduling methods are updated by manually tracking task start and end dates. However, newer methodologies like Chronographic Modeling and Dynamic Modeling of Occupancy Rate Scheduling (DMORS) introduce the need to also track the spatial positioning and occupancy rates of work teams and resources on-site. Given the complexity of tracking these parameters, especially on large construction sites, new technologies are emerging to support the data collection process. This paper provides an in-depth review of the most recent technologies available to capture the occupancy and spatial positioning of construction site resources, allowing for more dynamic schedule updates. Three main categories of technologies are examined : image and video capture, 3D point cloud generation, and sensor-based tracking systems. These tools have varying strengths in terms of portability, data accuracy, and their impact on ongoing work. The research evaluates these technologies against seven criteria essential for construction management : speed of data collection, equipment portability, quality and precision of data, worksite impact, post-processing time, data accessibility, and technology maturity. By analyzing the strengths and weaknesses of each technology, the study provides a framework for contractors to select the most appropriate tools based on project size, complexity, and available resources. For example, large contractors may prioritize high-precision tools like LiDAR and laser scanning for detailed site modeling,

while smaller contractors might opt for simpler, more cost-effective solutions like manual data collection paired with photos or videos. Ultimately, this research aims to support the adoption of Space Planning schedules within the construction industry by offering a clear methodology for integrating modern data capture technologies into site management. The article concludes with a discussion of future trends, emphasizing the potential for combining multiple technologies to enhance data collection accuracy and the need for further research into integrating artificial intelligence for automated analysis.

3.2 Introduction

Updating the construction schedule is an essential step in the smooth running of any project. This regular update will allow the contractor to quickly detect deviations from the game plan, and therefore to promptly take the necessary measures to bring the project back on time. This requires collecting information on the actual course of tasks. For a Gantt schedule, this task is well integrated into specialized softwares. This update is therefore well integrated into the contractors' management processes.

However, new planning techniques and methodologies have been proposed in recent years, such as the Chronographic Modeling (Francis, 2004, 2016, 2020) and the Dynamic Modelling of Occupancy Rate Schedule (DMORS) (Morin Pépin & Francis, 2024), both using Space Planning. If you want to update a schedule based on space planning, you need to know, in addition to the actual dates, the positioning of the resources present on the site and, in the case of DMORS, their occupancy. However, regularly recording the positioning of work teams on a site can quickly prove to be a considerable task. Thus, using technology could offer a solution to optimize the updating of a schedule based on space planning.

This article first reviews the most recent literature on technologies that make it possible to identify the positioning of work teams and resources. Then, a series of criteria is proposed to evaluate the performance of these technologies. This will allow a contractor to prioritize these criteria and choose the survey technology best suited for their needs.

3.3 Background and Justification

When it comes to data collection on construction sites, the topic of construction 4.0 and its principles (Hossan & Nadeem, 2019; Forcael, Ferrari, Opazo-Vega & Pulido-Arcas, 2020; Kozlovskaya, Klosova & Strukova, 2021) is a good place to start. Especially in the face of the digitalization of construction, which seems to be in construction 4.0 concepts, which therefore encompasses the entire construction project, from the initial idea to the final delivery to the customer. However, this research is more specific to a Space Planning schedule.

According to Rankohi *et al.* (2023), the Internet of Things (IoT), associated with tracking technologies, can improve automation through real-time capturing, accessing, tracking, and sharing information; which ultimately leads to more decentralized decision-making. More specifically, Raza (2013) points out that monitoring in construction offers the following advantages : i) Detection : simple presence of objects, ii) Identification : by class of object or unique instance, iii) Location information : specific co-ordinates or by area, iv) Object tracking : whether an object is moving or not, v) Object properties : information on shape, weight, speed, ownership, supplier information, etc., vi) Memory representation : historic data on object behaviors, and vii) Application specific processes : using tracking tags to manage objects, control them or capture alternate data.

In addition, Botton, St-Pierre & Lefebvre (2020) highlight the importance of choosing technological equipment that meets the criteria of durability, resistance and versatility, in addition to traditional needs such as the operating system, performance and storage capacity. Also, with the rapid evolution of technologies, the last 20 years have seen a multitude of literature reviews seeking to study and classify the technologies used to collect information. El-Omari & Moselhi (2009, 2011) outlines the design of an IT platform aimed at automating data collection from construction sites to enhance time and cost tracking, as well as overall project control. So they examined their capabilities to collect information on labor, material, equipment, quantity, task progress, weather conditions and productivity, problem areas.

Later Omar & Nehdi (2016) also mention that there are three types of RFID tags : active, passive, and hybrid. Active tags have their own power supply and transmit signals to the reader. Passive tags, on the other hand, rely on energy received through induction from the reader and are effective at distances up to about 15 meters. In contrast, active tags offer a much greater range, up to 500 meters, and can store more information. Hybrid tags can transmit signals but require activation by an external signal, such as a satellite. Omar & Nehdi (2016) also group technologies and evaluate them with the following criteria : setup and cost, automation level, automated analysis, applicability, training required, pre-processing level, integrated readiness, meaningful support for decision makers, computational cost, project size and comments.

Moselhi, Bardareh & Zhu (2020) draw a detailed portrait of capture technologies and list their capabilities, limitations and accuracy. In fact, vision-based technologies, such as laser scanning and photogrammetry or their integration, are good choices to generate point cloud data. However, they need post processing steps for 3D modelling which is manual and time-consuming. Above all, they studied research that merges collection technologies together in order to combine their capabilities. Finally, they mention that literature indicates that relying on a single source of sensory data is insufficient for assessing the status of onsite construction operations. For instance, laser scanner point cloud data require a direct line-of-sight and become less effective as the project progresses and the site becomes more congested. Employing additional data acquisition technologies could mitigate the limitations of relying solely on one type of remote sensing technology during various phases of the project.

3.4 Goal, Objectives and Limitations

3.4.1 Research Goal and Objectives

If you want to promote the adoption of Space Planning by the construction industry, you need to be able to track and update the schedule. As explained in the introduction, it is necessary to record the positioning and, if possible, the space occupied of resources and work teams. However, it is worth mentioning that since Space Planning is not applied on a large scale on construction

projects, it is difficult to question the needs of contractors on this topic. This does not prevent us from asking the question, reviewing the state of current technologies and determining their abilities according to the needs of the contractors. The goal of this research is therefore to offer a platform and a methodology that will allow entrepreneurs to choose the capture technology that is best suited to their needs.

3.4.2 Research Methodology

For this research, a literature review of the most recent developments in the available technologies to determine the positioning of resources and work teams was carried out. Thus, the first known and established technologies, such as manual note-taking and photos and videos are presented. Then, the latest developments are presented on technologies that allow the performance of 3D reconstructions (RGB, RGB-D and stereo camera images), 3D scans (LiDAR and laser scanning) and sensors (GPS, UWB and RFID). Then, the performance of each of these technologies is evaluated according to seven (7) criteria, which allows an entrepreneur to prioritize these criteria and choose the technology that will be best suited to their needs. A validation was therefore carried out by presenting examples of prioritization and technological choices according to the size of the company and the projects.

3.4.3 Research Constraint and Limits

It should be mentioned that the goal is not to identify all the technologies available, nor to automatically detect items on construction sites, but rather to take the state of the technologies at the time of writing this article. Thus, during this literature review, we focused on the essential points allowing entrepreneurs to choose the best technology to collect the positioning of work teams and resources to update a schedule using Space Planning. In addition, it was decided to study the application of technologies when used alone.

3.5 Traditional Methods

3.5.1 Manual Takeoff

A first option would be to simply walk through the entire site and take notes on paper or with a digital tablet . Although digital tablets are getting lighter, a good-sized screen can be an asset, which can reduce portability. However, there is a multitude of tablet accessories available that can make using the tablets on construction sites more enjoyable. The impact on the work is therefore minimal, if not non-existent because it is easy to go around the site and take notes without disturbing the work teams.

Of course, having an electronic version of the takeoff can be a challenge if you don't have access to a scanner, but phones usually have apps that allow you to scan documents. In addition, considering that all phones, tablets and computers can read PDFs, accessing the information is almost instantaneous. The time it takes to complete a takeoff depends on the level of detail that has been noted. The more details that are written during the takeoff, the longer the takeoff will take, but it will also be more accurate. The processing will therefore be minimal because it is done as the notes are taken. It should be noted that after the survey, it will be difficult, if not impossible, to extract more information than what had been noted.

If you use pen and paper, you will need to scan the statement if you want to share it. Otherwise, if you write on a digital tablet, the readings will be directly available, especially since the tools that allow you to write on a tablet or a computer screen are becoming more and more sophisticated and efficient.

3.5.2 Pictures and Videos

Contractors are already experienced in taking photos of certain parts of the site. However, as part of the update of the Space Planning schedule, it is necessary to get photographs of the entire project in detail. At least most cameras can be programmed to take photos at regular intervals. In this situation, you just have to program the camera and walk through the whole

project. Although there are cameras (standard and spherical) specially designed to be portable, the quality of photos and videos may not be sufficient. However, high-quality cameras tend to be larger, especially in the case of cameras specialized in taking spherical photos and videos.

The quality of the survey depends mainly on the quality of the camera used and the number of photos taken. In addition, some cameras and lenses can distort the image (Figure 3.1), and if you just walk on the construction site with a camera in automatic mode, you may have several blurry photos that will be impossible to process (Figure3.2). Filming the construction site as a whole could help with this problem. However, the resolution of a movie is often lower than that of photos. Therefore, there could be a loss of detail in certain situations. But in any case, the impact on the work is minimal.

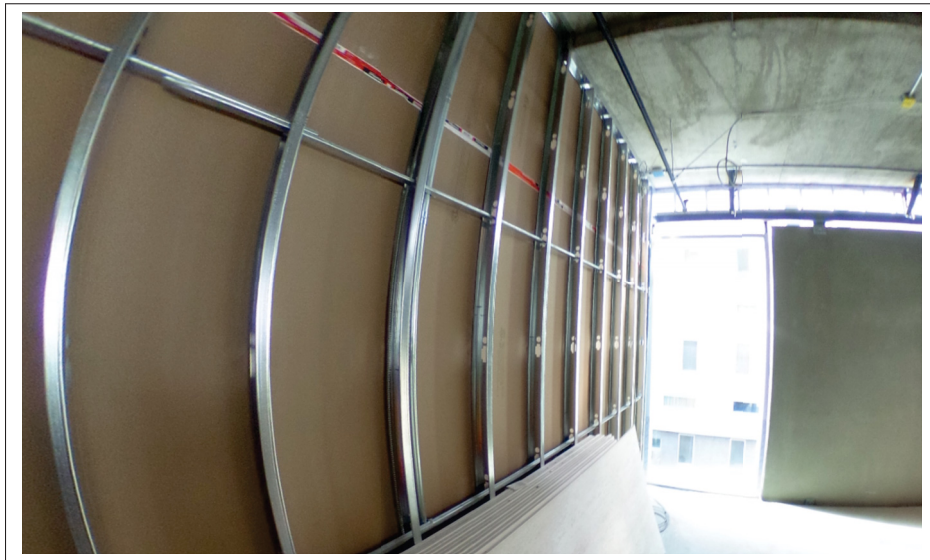


FIGURE 3.1 Distortion from a spherical image

After the survey, the processing will be time consuming, because it is necessary for a person to analyze each of the photos taken in order to extract the information. Artificial intelligence (AI) could eventually lend a hand. However, the study of AI's ability to identify the different elements on construction sites is outside the context of this article. For standard photo processing, there is a multitude of software for viewing photos, which have various functionalities. However,

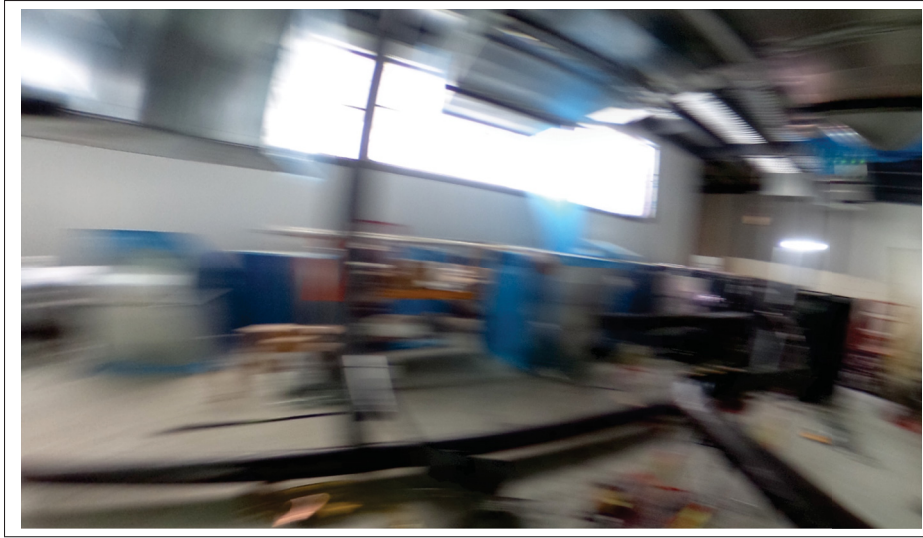


FIGURE 3.2 Blurry image from a camera in automatic mode

spherical photo processing is more complex, as software to process spherical photos is rarer, so one is usually dependent on the software provided by the camera manufacturer.

Accessing photos (standard or spherical) is usually simple, as there are a multitude of solutions, whether local, on a network or on the cloud, to store and consult them. However, photographing the entire project, every time you want to see the positioning of the resources, will generate a very large amount of photos. This requires considerable storage space, which can easily exceed one (1) terabyte (TB). Again, one solution would be to film the entire construction site, but the higher the quality and frame rate of the video, the larger the video size will be.

3.6 3D Reconstruction

Several research projects already propose solutions that use computer vision to automatically detect the installation of building components (Ibrahim, Lukins, Zhang, Trucco & Kaka, 2009; Zhu, German & Brilakis, 2010; Hamledari, McCabe & Davari, 2017), monitor the movements and performance of workers (Weerasinghe & Ruwanpura, 2009; Brilakis, Park & Jog, 2011; Gong, Caldas & Gordon, 2011; Park & Brilakis, 2012), compare 3D reconstruction to the 3D BIM model (Kim, Kim & Son, 2013) or dynamically detect workspaces (Luo *et al.*, 2019).

However, in the context of 3D reconstruction, the goal is to use photogrammetry, stereo cameras or Time of Flight (ToF) cameras and specialized algorithms to create a large-scale 3D model of the project under construction. However, these solutions are usually designed to perform a 3D reconstruction of a limited number of objects with the help of specialized algorithm. As part of this research, we seek to identify the positioning of several objects directly on these 3D reconstructions. This requires producing the most detailed 3D reconstruction possible of the entire site.

According to Schöps, Sattler, Häne & Pollefeys (2017), 3D reconstruction has numerous applications, including augmented reality, 3D modeling, and architecture. The ability to create dense 3D models in real-time or near real-time on mobile devices, such as smartphones and tablets, is crucial for making 3D reconstruction accessible to non-expert users. Real-time feedback from the device enables users to assess the current quality of the reconstruction and identify areas where additional data is needed."

By analyzing the applicability of image-based 3D reconstruction for civil engineering projects, Fathi, Dai & Lourakis (2015) highlight the emergence of many efficient and inexpensive technologies, particularly those utilizing computer vision techniques for capturing and modeling reality. Generally, these techniques involve three major steps : i) collecting optical sensor data, ii) processing the raw sensor data into 3D points, and iii) modeling and extracting measurements from the generated 3D points. However, Fathi *et al.* (2015) also mentions that several factors can influence the quality of reconstruction (e.g., large-scale, far-range, cluttered, poorly-textured, repetitive patterns, etc.) and that there are still several major challenges that will have to be overcome before these capture methods can be applied to an entire site.

Scalable geometry reconstruction and understanding continue to be significant challenges. Existing methods often struggle with false loop closures in scenes with similar-looking rooms and typically lack the capability for live scene understanding (Zheng, Zhang, Han, Xu & Fang, 2022). Additionally, the high computational complexity of repeatedly generating the entire dense model results in poor scalability (Kähler, Prisacariu & Murray, 2016).

However, we cannot ignore the continuous increase in the computing capacity of processors and the continuous development of 3D reconstruction algorithms, such as the BuildingFusion, developed by Zheng *et al.* (2022), which proposes a semantic-aware structural building-scale reconstruction system that enables collaborative dense reconstruction at the building scale and provides real-time semantic and structural information. This makes large scale 3D reconstruction an interesting option.

3.6.1 Photogrammetry and RGB images

If we focus more specifically on photogrammetry and the use of RGB photos, this section can be seen as a continuation of the section 3.5.2, as the goal is to take a series of RGB photos of an object and use a specialized algorithm to produce a 3D model, and there are a multitude of algorithms that can be used to produce a 3D reconstruction from photos. This technology, known as monocular RGB is used in Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), Visual Odometry (VO), or Structure from Motion (SFM) to achieve 3D reconstructions of the environments (Herrera-Granda, Torres-Cantero, Rosales & Peluffo-Ordóñez, 2023).

This type of 3D reconstruction requires photographing the site with even more precision and quality photos, so that the specialized algorithm can convert the photos taken into a 3D model. As mentioned above, this kind of processing is usually time-consuming, and requires a lot of computing resources, even for small objects. This makes its application unrealistic for a complete building, with the algorithms available at the time of writing this article.

Good quality cameras are already available on the market and several software, both paid and free, are also available to process the photos and to generate and view the 3D model, which is usually available as a point cloud. You can even find smartphone applications that can directly generate 3D models. But this requires taking a very large quantity of good quality photos of the site, the chances of the photographer hindering the work are not negligible. The quality of the 3D reconstruction depends on the quality of the photos and the settings of the software used. This makes it difficult to assess the quality before the 3D model is generated. But it is still possible to

generate a good quality 3D model using this technology. Finally, portability depends on the size of the camera used, but generally, cameras that can take quality photos tend to be larger.

3.6.2 Stereo Camera

A first solution to the problems mentioned in the section 3.6.1 is to use a stereo camera. This type of camera, often used in machine vision, uses two (2), or more, sensors and specialized software to simulate human 3D vision. When properly configured, it is possible to generate a real-time 3D reconstruction with this technology. Stereo cameras offer superior depth detection for 3D reconstruction compared to single-image systems and are already commercially available. However, the modeling solutions provided by these camera manufacturers are typically designed for technology developers and industrial applications, requiring advanced computer programming knowledge for effective use (Morin Pépin & Francis, 2019). However by using a good stereoscopic camera, it is possible to get a good quality 3D model. Nonetheless, although stereoscopic cameras are portable, they must be connected to a computer in order to process the information generated by this type of camera.

3.6.3 Time-of-Flight (ToF) Cameras, Depth Cameras, and RGB-D Images

Another solution is to use RGB-D images. These images are standard RGB images with the *distance* added as additional information. Obtaining RGB-D images can be done with the help of technologies such as the Kinect from Microsoft, the Google's Project Tango and the ToF camera. ToF cameras involve active illumination, and deliver range (or depth) data by measuring the time needed for a light signal to travel from the camera light source to the scene and back to the camera sensor. Unlike vision-based approaches that generate depth maps from standard camera images, depth sensors can measure depth in uniformly or weakly textured regions, which often dominate indoor scenes (Schöps *et al.*, 2017). In such systems the user walks around with a hand-held device and reconstructs the scene, allowing the user to directly add data where it is needed, but this type of sensors are usually restricted to indoor use because of too strong background

illumination by the sun, and have a limited depth range (Schöps, Sattler, Häne & Pollefeys, 2015).

ToF cameras use active illumination to provide range (or depth) data by measuring the time it takes for a light signal to travel from the camera's light source to the scene and back to the camera sensor. Unlike vision-based approaches that create depth maps from standard camera images, depth sensors can measure depth in uniformly or weakly textured areas, which are common in indoor scenes (Schöps *et al.*, 2017). In these systems, users walk around with a handheld device to reconstruct the scene, allowing them to add data where needed. However, these sensors are typically limited to indoor use due to strong background illumination from the sun and have a restricted depth range (Schöps *et al.*, 2015).

Additionally, Anderson, Herman & Kelly (2005) emphasize that the primary algorithmic challenge in implementing this idea is the same reason why ToF cameras have not yet dominated the 3D scanning market : ToF sensors suffer from very low X/Y resolution, adverse random noise behavior, and a significant systematic measurement bias. Furthermore, since ToF cameras are active devices with their own illumination source, special precautions are necessary when operating multiple cameras simultaneously (Mure-Dubois & Hügli, 2008).

He & Chen (2019) raise several interesting properties that differentiate ToF cameras from other technologies that allow you to obtain RGB-D images : i) video-rate image acquisition, ii) compact and fixed structure, iii) illumination adaptation, iv) self registration of dense depth data and color image, v) small and light weight.

However, (ToF) sensors still have lower resolution compared to other vision sensors like color cameras and laser scanners. Additionally, despite improvements in signal-to-noise ratio (SNR) through various methods, superfluous noise remains a concern. Furthermore, challenges such as phase wrapping continue to require better solutions (He & Chen, 2019)

Even high-end phase-based depth cameras can experience deviations. This is why Frangez, Salido-Monzú & Wieser (2022) examined these deviations in distance measurements (Figure

3.3), using on : 1) the effects of self-warming and external temperature ; 2) the range noise as a function of distance and acquisition time ; and 3) the distance-dependent biases.

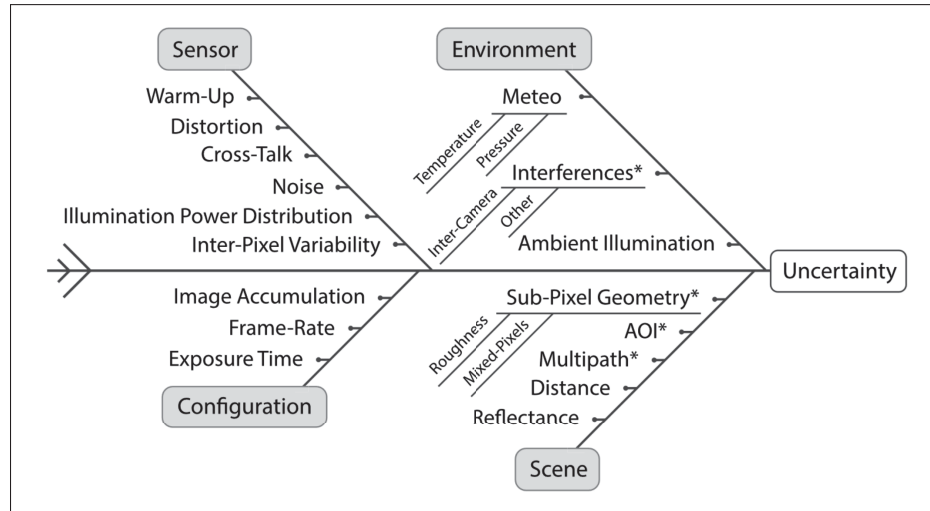


FIGURE 3.3 sources of uncertainty for the distance measurements of ToF depth cameras, Adapted from Franguez *et al.* (2022)

Zollhöfer *et al.* (2015) demonstrated that it is possible to have user-friendly methods that enable real-time 3D reconstruction while walking on site, using equipment readily available to users. This makes scanning accessible even to non-technical staff and allows users to immediately address scanning errors (see figure 3.4) during the reconstruction capture.

Kähler *et al.* (2016) highlight that while offline and real-time dense reconstruction are quite mature, it is only recently that real-time dense modeling and reconstruction have become feasible. This is due to the availability of affordable RGB-D sensors and the performance of modern graphics processors. Rapid delivery of dense and highly detailed 3D environment reconstructions is currently one of the main frontiers in computer vision. So, Hou *et al.* (2022) have proposed algorithms that can find optimal solutions for rapid movements, long-loop closing, multiple rotations, and large-scale reconstructions, thereby enabling the generation of accurate and complete models.

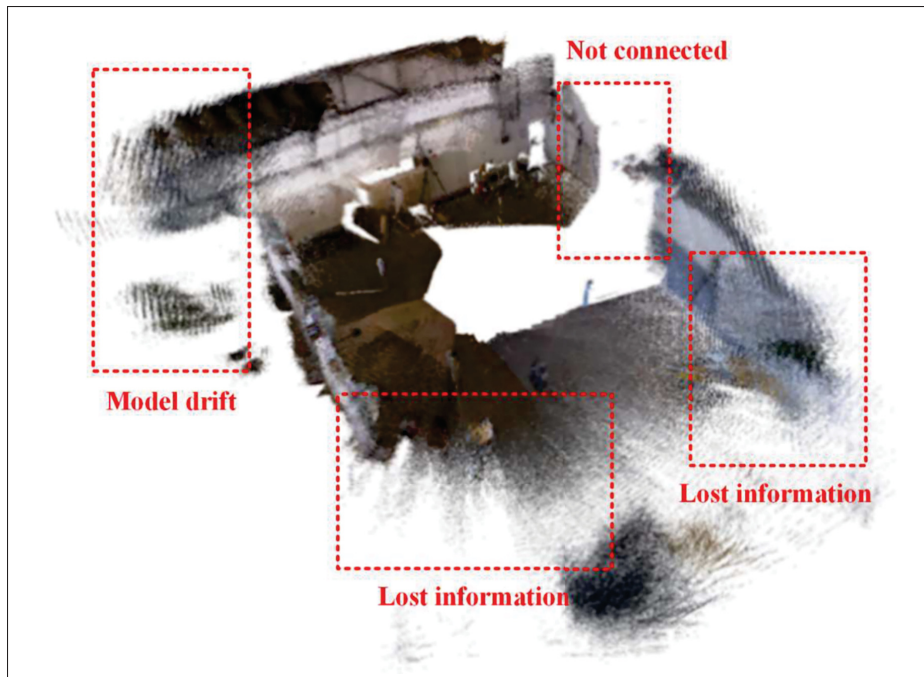


FIGURE 3.4 Common problem of 3D reconstruction using RGB-D images, Adapted from Hou *et al.* (2022)

3.7 3D Scan

3.7.1 Laser Scanner

Another possibility is using of a long-distance laser scanner, also known as a Ladar, to make a high-precision, full-color 3D scan of the scene. Especially since their use is already widespread in the construction industry, among other things to detect certain construction defects and deformations in structures (Figure 3.5). Also, several models of laser scanners are available on the market. The challenge with laser scans is therefore to use their precision to control various parts of the construction process (Akinci *et al.*, 2006; Nguyen, Do, Pham & Nguyen, 2021; Pica & Abanda, 2021), by generating a digital twin (Hosamo & Hosamo, 2022), by comparing the scan with a 3D model of the building (Stereva, Postolovski & Gospodinov, 2020) or to improve communication (Dinis, Sanhudo, Martins & Ramos, 2020).

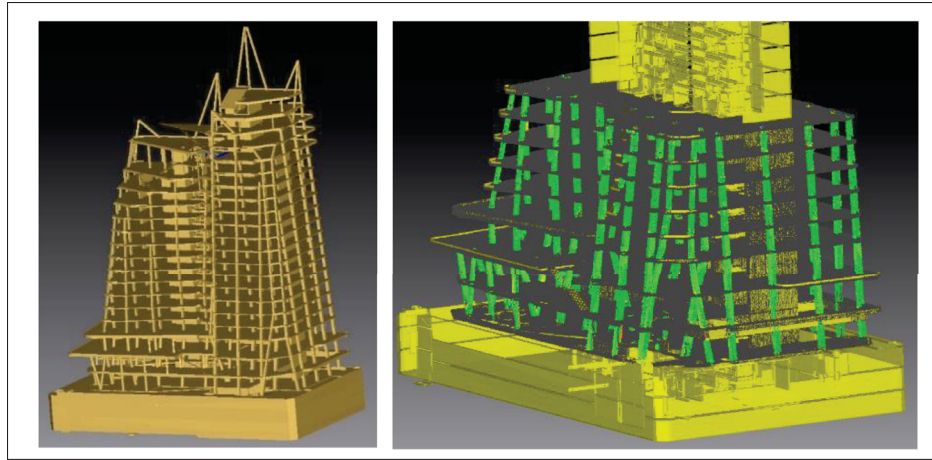


FIGURE 3.5 (Adapted from Stereva *et al.* (2020)) Left :3D BIM model, right : 3D model and Measured Point Cloud

However, the vast majority of these types of scanners need to be stationary when the scan is performed, this can have a significant impact on the work. In addition, they do not work very well when objects are moving when scanning. However, it generates a high-precision 3D scan. For this reason, the effective and efficient collection of laser scan data can be carried out with the help of a prior optimization process, which can be called Scan Planning (P4S). Aryan, Bosché & Tang (2021) explain that some experts in the field have formalized the P4S problem as determining the minimum number of predefined viewpoints necessary to ensure complete scan coverage while meeting data quality requirements. Thus, motivated by the need for automated P4S methods for applications in the building sector, they carried out a detailed review of the types of performance criteria that these methods must meet (accuracy, level of detail, level of completeness and registrability) as well as the parameters influencing these criteria.

3.7.2 Light Detection and Ranging

Light Detection and Ranging, better known as LiDAR, is a technology that is specifically designed to make a high-precision 3D scan in real-time, minimizing the impact on the work when the survey is carried out. However, this technology alone does not collect the color of the elements, and color can be an important factor in the identification of materials. But the fact

that LiDAR is compact and fast makes it particularly efficient for scanning while on the move. Their use is widespread in the field of autonomous vehicle driving. On the construction side, it is possible to add LiDAR to Boston Dynamics's SPOT robot (Wetzel, Liu, Leathem & Sattineni, 2022).

However, LiDAR-only is usually reserved for developers of systems and technologies who need their use. But combined technologies are starting to appear on the market, such as computer equipment manufacturers who have started to integrate Lidar into their digital tablets (Mêda, Calvetti & Sousa, 2023). Because of their qualities and speed, LiDAR make them a good candidate to quickly make good quality 3D reconstructions.

Their inability to collect the color of items is a serious disadvantage for this article. To overcome this limitation, and to obtain a color 3D model, in recent years, several research and technology developers have sought to merge Lidar with other technologies, such as cameras, in order to add color to scanner elements. Thus, the combination of these 2 technologies offers the potential to combine the advantages of LiDAR with those of (Cai, Ou & Qin, 2024) cameras. In this situation, the quality depends on the scanner used, and at the time of writing this article, the quality and accuracy of compact and handheld scanners may be questionable for use within the scope described in this article. Scanners that allow good accuracy to be obtained are currently large and difficult to carry.

3.8 Position Sensors

Unlike the technologies presented above, which require moving around the entire construction site to obtain the position of assets, sensors offer the possibility of monitoring the position of assets and workers in real-time directly from the office. However, it is necessary to install a sensor on each item you want to track and to make sure that they remain installed throughout their use. It should be noted, however, that the sensors do not directly determine the area occupied. This area must be determined indirectly, usually by noting the size of the object on which the sensor has been installed.

3.8.1 Global Positioning System

The Global Positioning System (GPS) is an interesting option, especially for outdoor environments. However, GPS requires a clear line of sight to orbiting satellites, so their application inside a building may be limited (Khoury & Kamat, 2009). This means that their proper functioning depends on the reception of the signal from the satellites in orbit (El-Omari & Moselhi, 2011). The standard GPS accuracy is 10-15 meters, 95% of the time (Acosta & Toloza, 2012).

Despite these particularities, GPS makes it possible to obtain the positioning of the sensors in real-time, without the need to travel to the site. Especially since many computer items are already equipped with GPS sensors. Their impact on the progress of the work is therefore negligible.

3.8.2 Ultra-Wideband

The use of Ultra-wideband (UWB) sensors requires the installation of sensors and the use of stations (fixed or mobile) to obtain the positioning of the elements on which a sensor has been installed. They can be used both inside and outside a building. Cho, Youn & Martinez (2010) mention that using this type of sensor to determine a fixed location (e.g., a ceiling, a wall, and a column) is not an easy task when construction is underway. Sensors should usually be installed after the constructed surfaces have been completed. To apply this technology on construction sites, base stations (sensor nodes) must either be frequently moved to another location or mobile. In addition, the network cables connecting all the stations can be cumbersome for the teams on the construction site. Cho *et al.* (2010) also point out that UWB sensors have better signal penetration capability and high resistance to multipath distortion, and can therefore achieve better position accuracy.

UWB has several advantages over other tracking and positioning technologies (Shahi, Aryan, West, Haas & Haas, 2012) : i) has longer read ranges than laser- or vision-based detection and tracking systems (up to 1000 m); (ii) can operate both indoors and outdoors; iii) requires a low average power consumption due to the low pulsation rate; and (iv) compared to RFID systems, UWB does not need to be integrated with other technologies to provide accurate 3D

position estimation. In a search for UWB capabilities, Shahi *et al.* (2012) achieved laboratory accuracy between 0.1 m and 2.0 m, while mentioning the importance of receiver layout design and site-specific error characterization. Their data also showed that not only did the magnitude and variability of the error increase as the site became congested, but the direction of the error also changed.

3.8.3 Radio Frequency Identification

In the manufacturing industry, radio frequency identification (RFID) systems exist for the identification of objects on conveyors (Arif, Ray, Vela & Teizer, 2014). There are three types of RFID tags : active, passive, and hybrid. Passive tags obtain the required energy by induction from the readers, with a reading distance of up to 15m. The active tags, on the other hand, incorporate a battery, which will need to be replaced, which provides the necessary power for their circuits to propagate the signal to the reader and has a range of up to 500m and can store a significant amount of information. Hybrid tags can transmit, but they must be activated by a signal, which can be a satellite.

According to El-Omari & Moselhi (2009), the use of RFID depends on the need to read data remotely and update the information stored on RFID tags. They therefore point out that the application of RFID to identify work teams is important because they can easily be tracked as they move from one activity to another. However, this requires that RFID readers be installed around the construction site to track the movements of personnel and equipment, so that relevant information regarding their work activity and time spent is automatically collected. We would therefore be faced with the same problem as for UWB. Their main advantage is the ability to use handheld readers to read the information on the labels, making the reading faster and more efficient.

However, as mentioned by Arif *et al.* (2014), marking all components is neither practical nor economical. Furthermore, they mention that small-scale metal building materials pose challenges for the application and use of RFID tracking technology. RFID tags applied to materials can suffer

damage due to the inherent harsh nature of the building environment. When used on enclosed or partially covered construction sites, RFID tags experience a net decrease in communication range in the presence of metals in the vicinity (Omar & Nehdi, 2016). One solution would be to identify only the piles of materials and certain important tools to limit the risk of damage and loss of the RFID tag.

Another one of the major flaws of RFIDs, for their application in the scope of this research, is that they have not been specifically designed to locate elements in space (3D location). This has not prevented some research from proposing solutions to locate RFID tags in space. So, Ko (2013) have developed a 3D RFID position detection algorithm using a trilateration method that calculates the position of the target object using the distances between the RFID antennas and the target object (Figure 3.6). While Maneesilp, Wang, Wu & Tzeng (2013) have developed separate solutions for passive RFID tags and active tags. However, their studies have shown that the application of the RFID system for 3D localization of materials on site encounters certain difficulties, as a high density of reference tags at height is required.

3.9 Capability

Remember that the objective is to help contractors find a technology that will help them update a schedule using Space Planning. This technology should allow the contractor to regularly collect the positioning and occupancy of work teams and resources on the site. Several factors can influence the choice of the technology that will be the most advantageous for a contractor such as the size of the site, the size of the contractor, the ability of the contractor to train his staff, the desire of the contractor to participate in the development of emerging technologies, and more. The seven (7) parameters presented are therefore intended to rank the performance (P-index) of the technologies. The entrepreneur will be able to choose the collection technology that best meets his priorities. The following sections will detail the performance of the technologies presented in Table 3.1.

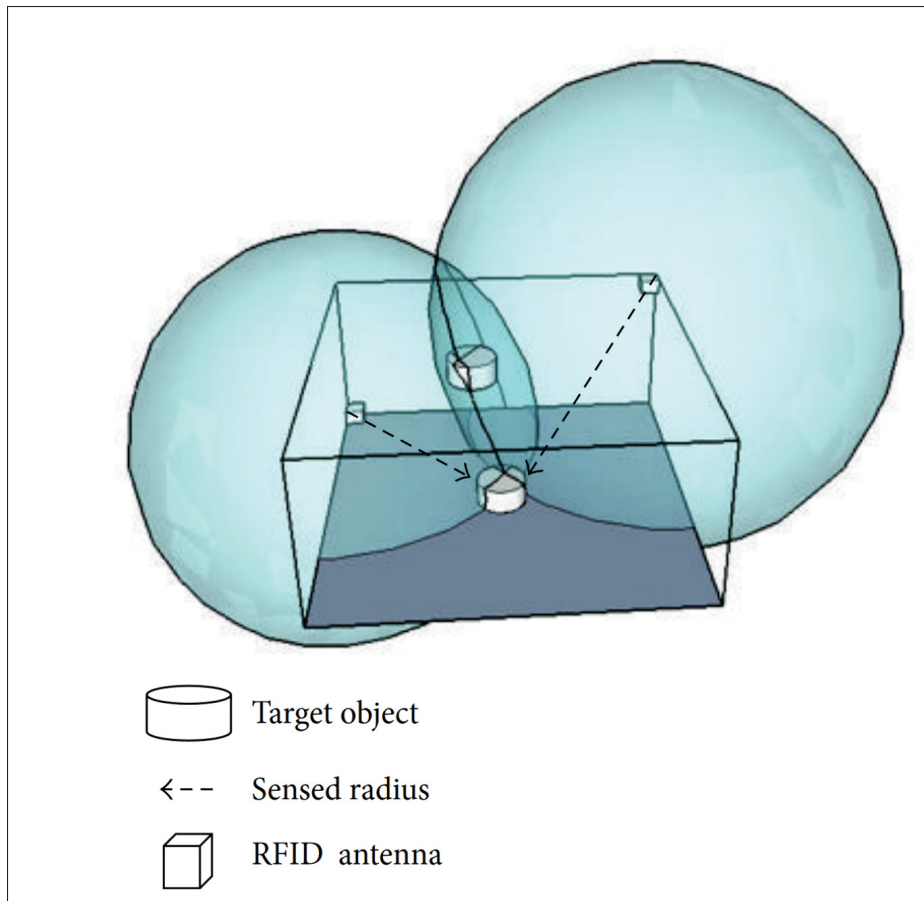


FIGURE 3.6 Trilateration method to calculate an object location using RFID, Adapted from Ko (2013)

3.9.1 Collect Speed

Collect speed refers to how quickly technology can perform a complete takeoff. Because the bigger a site, the longer a complete takeoff will take. This will therefore have a direct impact on the time required to make a complete takeoff. Especially since it would be inefficient to take more than a day to carry out a complete survey.

On the UWB and GPS side, once the sensor is installed, it is possible to obtain their position almost instantaneously. Whereas if you use a portable RFID reader, you have to walk through the construction site to get the positioning. The ability of Lidar to do a 3D scan while on the go makes them interesting if you want to do a 3D scan. Compared to laser scans where the station

has to be repositioned, scanning an entire building is therefore a very time-consuming task. For photos & videos, and 3D reconstructions, these technologies require the entire site to be walked, so their collection times are similar.

3.9.2 Equipment Portability

To perform a takeoff, it may be necessary to walk a long distance with the device. Thus, the size and weight of the device used will impact the choice, since a lightweight and portable technology could be an asset by making it more pleasant to use.

Again, UWB and GPS are the most interesting on this point, since it is possible to obtain the positioning without walking on the construction site. For RFID, photos and 3D RGB reconstruction, it is possible to walk the construction site with a simple handheld device. Compared to stereo cameras, RGB-D 3D reconstructions and LiDAR need to be connected to a computer system in order to work properly. Finally, the laser scanner usually needs to be in a fixed location for a few seconds, usually on a tripod, to perform the scan.

3.9.3 Quality and Precision

Ultimately, the main objective is to carry out a quality takeoff that will be accurate, because this will have an impact on the quality of the update of the Space Planning schedule.

On this point, laser scans and LiDARs have a good advantage because they allow you to obtain a high-precision 3D scan of the position and the space occupied. The only point is that the LiDARs alone cannot collect the colour of the items. On the 3D reconstruction side, although it is possible to obtain a 3D rendering of the site to take measurements, a multitude of factors can influence the quality of the 3D reconstruction. But this is still an advantage to comparing taking photos & videos alone which need to be analyzed in detail to extract more information. It is also possible to be precise with UWB, but several factors, such as the presence of metal elements, can interfere with this accuracy. GPS is in a similar situation where the buildings can block the

signal. Finally, although there are solutions to obtain their positioning, RFID is not designed for this.

3.9.4 Worksite Impact

Maintaining a consistent flow of work on the job site is essential for the smooth running of the construction, especially if you want the takeoff to reflect that flow. It is therefore preferable, even essential, that the takeoff does not have a negative impact on the work in progress. Thus, it is good to mention that, for several technologies, it will be necessary to walk on the entire site to carry out a complete takeoff. In this context, and depending on the nature of the work carried out, some parts of the site may not be available. This is therefore an advantage of using a GPS, since you can access their position without having to walk through the site. It is similar to RFIDs, which can be detected remotely. Although this is also the case for UWB, once the sensors are installed, multiple receivers must be installed on the construction site, and these receivers can interfere with the work flow.

3.9.5 Treatment Time

Regardless of the takeoff technology chosen, a period of time will be required to process the information collected so that it is available to the management team for the schedule update. A contractor will therefore have to devote the necessary resources to this processing, making these resources unavailable to perform other tasks, especially if it is labor. This means that a long post-survey processing time is required, such as the analysis of individual photos and videos, which could increase the cost of using the chosen technology. UWB, GPS and RFID still have the advantage because it is possible to obtain their position directly. Then, for Lidar, stereo cameras and 3D RGB-D reconstruction, if they are well configured, it is possible to obtain real-time 3D reconstruction. This is not the case with 3D RGB reconstruction and laser scans where the data must be processed after collection.

3.9.6 Information Access

It is crucial to ensure that the information collected remains accessible during and after the project. Additionally, since some technologies require specialized software to process and visualize this information, it is essential to ensure the long-term availability and compatibility of this software. This is why manual notes and photos have an advantage, as the majority of computers, phones and tablets can view PDF documents, photos and videos. For 3D scans and reconstructions, the information is usually available in the form of a point cloud, and although their use is more specialized, applications are available to visualize point clouds. Finally, for GPS, UWB and RFID, it is generally necessary to use the tools provided by the developer of this technology to visualize the information collected.

3.9.7 Maturity

The goal of this research project is not to develop survey technologies. On the contrary, this criteria is to ensure that the technology is available, applicable, reliable, accessible and requires a minimum of development. On this point, manual surveys and photos & videos have another advantage because anyone can use these technologies without requiring training. It is a bit the same thing for GPS, which is now installed by default in a variety of computer equipment. Although the use of laser scanners is now widespread in construction, it requires good training for the user. On the UWB side, although systems are available, proper use requires special attention to ensure that the sensors and stations are properly positioned, and to limit interference. Finally, the use of other technologies to collect positioning requires the user to have good computer knowledge.

TABLEAU 3.1 Performances of the technologies

P-index*	Collect speed	Equipment portability	Quality and precision	Worksite impact	Treatment time	Information access	Maturity
1	UWB	UWB	Laser scanner	GPS	UWB	Manual takeoff	Manual takeoff
2	GPS	GPS	Lidar	RFID	RFID	Pictures & videos	Pictures & Videos
3	RFID	RFID	RGB 3D	Lidar	GPS	Laser scanner	GPS
4	Lidar	Pictures & Videos	Stereo Camera	Manual takeoff	Manual takeoff	Lidar	Laser scanner
5	Pictures & Videos	RGB 3D	RGB-D 3D	Pictures & Videos	Lidar	RGB 3D	UWB
6	RGB-D 3D	Manual takeoff	Pictures & Videos	RGB-D 3D	Stereo Camera	RGB-D 3D	RGB 3D
7	Stereo Camera	Stereo Camera	UWB	Stereo Camera	RGB-D 3D	Stereo Camera	RGB-D 3D
8	RGB 3D	RGB-D 3D	Manual takeoff	RGB 3D	Laser scanner	GPS	Lidar
9	Manual takeoff	Lidar	GPS	UWB	RGB 3D	UWB	Stereo Camera
10	Laser scanner	Laser scanner	RFID	Laser scanner	Pictures & Videos	RFID	RFID

*P-index = performance index (1 = best performance and 10 = least performant)

3.10 Validation, Technology Selection

To demonstrate the difference between the selected technologies, two (2) examples are presented. The first is that of a small general contractor working in the residential sector and the other is that of a large general contractor handling private and public contracts regularly exceeding \$250 million. Each of them will have different priorities (Table 3.2) with respect to the criteria presented in the 3.9 section.

TABLEAU 3.2 Example of prioritization of takeoff technology evaluation criteria by a small vs. a large contractor

Priority No	Small contractors	Large contractor
1	Maturity	Worksite impact
2	Treatment time	Collect speed
3	Information Access	Quality and precision
4	Quality and precision	Information Access
5	Collect speed	Equipment Portability
6	Worksite impact	Maturity
7	Equipment Portability	Treatment time

On the side of small contractor, they mainly deals with small residential projects, single-family houses and small apartment blocks. Due to the small size of the projects, takeoffs are generally short and fast to complete, the time to perform a takeoff will not be a priority. In addition, since there is rarely more than one work team in each building under construction, there is less fear of impacting the work during takeoff. However, its resources are limited for procurement, training, and data processing. Thus, maturity, processing time and access to information would be the priority. Based on these priorities, if we look at the three (3) best-performing technologies for each of the criteria presented in Table 3.1, a combination of manual surveys and photos & videos would be a good solution.

For the large contractor, due to the size and duration of the project, he could decide to prioritize the impact on the work and the speed and quality of the survey, which would promote a smooth work flow. Since it has the necessary resources, maturity and processing time may be less of

a priority. So, still looking at the three (3) best-performing technologies in Table 3.1, LiDAR could prove to be a good solution. However, their inability to collect the colour of the elements could be a significant problem. RFID could be another solution, but since it is not designed to accurately collect the position of items, the quality of the reading may not be sufficient.

Looking a little further about performance, doing a 3D RGB-D reconstruction could be the solution. Although this technology is not the best for any of the criteria, it performs relatively well everywhere. Thus, with some development, the manager in charge of doing the survey could go around the site with a ToF camera and a computer, and make a complete takeoff in a reasonable time. In addition, the quality would be sufficient to extract the positioning and occupancy of items on the site.

3.11 Conclusion and Discussion

This article aims to analyze several technologies that make it possible to collect the position and occupancy of work crews and resources on the site. First, a literature review of the most recent developments was carried out for each of the proposed technologies. Subsequently, seven (7) performance criteria reflecting the needs of contractors are used to evaluate the technologies.

Depending on the priorities and capabilities of each contractor, the most suitable survey technology may vary. Examples for small and large contractors are used to demonstrate the process of selecting the most suitable technology. For a small entrepreneur, traditional techniques such as taking manual notes and photos and videos are still the best solution because their use is well known and generally well established in the contractor management process.

However, for a large contractor, the size of construction projects makes choosing technology more difficult. The sensors, as described in section 3.8, have the advantage of being fast without the need to move around the entire site when you want to take a reading. However, their accuracy can vary greatly depending on the conditions on the site and it is not possible to directly determine the occupancy of the elements detected.

The 3D reconstruction, detailed in section 3.6, with RGB, RGB-D images and stereo cameras, performs relatively well. However, there is still development to be made to make them more accurate and effective. The increase in computing power makes it possible to use increasingly efficient algorithms. Therefore, there's a good chance that these technologies will become more refined over the years.

About 3D scanning side, explained in section 3.7, laser scans and LiDAR enable very precise readings, and it is on this point that they have an advantage over 3D reconstructions. Currently, Lidar with its speed and accuracy, seems to offer the best possibilities, but it cannot collect the color of the elements, which laser scans can do. However, the fact that the laser scans must remain fixed during the scan can hinder the smooth running of the work on the construction site.

3.12 Future Research

The performance of each of the technologies evaluated in this paper varies greatly, and this presents a challenge when it comes to doing a takeoff on a large construction site using only one technology. One solution that is regularly proposed is to combine several technologies together. The next step would be to study the effects and capabilities that could be achieved by pairing several technologies together. In addition, there is a moral dilemma in tracking the movement of workers at all times. It is therefore necessary to study the receptivity of workers and unions when work teams are constantly monitored when they arrive at a site.

CHAPITRE 4

MODELING AND CATEGORIZING STANDARDIZED ARTEFACTS FOR SCHEDULING OCCUPANCY ON BUILDING CONSTRUCTION SITES

Stéphane Morin Pépin¹ , Adel Francis¹

¹ Département de génie construction, École de technologie supérieure,
1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article publié à la revue « Frontiers in Built Environment » en mai 2024.

4.1 Abstract

The new trend in planning building projects involves incorporating space management on the construction site. Failing to consider the management of site operations can lead to either relaxed or congested construction sites. This is because labour, tools, equipment, and materials all require space. It is important to plan for the circulation and temporary storage of materials, including recycling, reuse, and disposal. Temporary installations and finished products also take up space and can impact traffic flow. For example, partitions can impair traffic flow, while finished flooring can restrict it. The occupation of spaces also changes as the work progresses, so it is important to monitor and accommodate these changes. Therefore, space management needs to be coordinated throughout the construction phase. Traditional planning methods do not consider the analysis of critical spaces or their evolution over time. As a result, they produce schedules that do not reflect the reality of the construction site. Dynamic space-time planning means modelling the operational flow in different sectors of the construction site to optimize the construction process. Efficient space occupation allows for more effective utilization of available resources. This paper aims to analyze the spatial requirements of various construction operations and develop standardized artefacts that integrate spatial information into the schedule. To achieve this objective, the methodology aims to : (i) Conduct site surveys to collect data and analyze construction operations and their spatial needs, (ii) Define the necessary parameters for determining the occupancy rate (OR), (iii) Develop the needed artefacts to represent the static models based on the survey results and the developed occupancy parameters to visually

depict and compute various types of occupancy and operations, (iv) Conduct workshops with professionals in the construction industry. The participants were asked to provide feedback on whether the artefacts effectively captured the various aspects of construction work, such as equipment, tools, materials, and safety protocols. The aim is to validate that the artefacts are reliable representations of real-life construction scenarios. The feedback and input provided by the professionals helped to ensure that the artefacts were accurate, informative, and valuable for training purposes in the construction industry.

4.2 Introduction

The conventional approach to planning building construction projects uses the Gantt/Precedence diagram to produce an execution schedule. This method combines the visual representation of a Gantt chart with the logic of the Precedence Diagram Method (PDM) to calculate the critical path of activities and margins. Resources are then allocated to activities and leveled out in an attempt to smooth out their use. With its four types of relationships PDM permits the overlapping of the activities which have partial start or partial finish dependencies, without an obligation of splitting them. These same dependencies, which makes the method more manoeuvrable, affects its accuracy. Errors can arise, such as the reverse critical path (Wiest, 1981) in which when one diminishes (increases) the duration of a critical activity, the project duration increases or be unchanged (diminishes or be unchanged). This method also lack precision with the use of multiple calendars (Kim & de la Garza, 2005), or when using lags to simulate production (Francis & Miresco, 2006). These inaccuracies can compromise the reliability of the schedule and hinder the ability to effectively monitor activity interdependencies. Moreover, the critical path calculation solely relies on activities and time, compromising its accuracy for planning building projects. Neglecting factors such as space use, resource availability, material handling, and storage, leads to an inaccurate and incomplete schedule. Scheduling simultaneous activities in the same place, or leaving spaces underutilized, may lead to congestion or relaxation at sites, impacting the project's timeline. Thus, this logic poorly responds to both the needs of general contractors and subcontractors. General contractor coordinates subcontractors at the

construction site to ensure linear production and prevent relaxed or congested construction sites. They also oversee material supply logistics. Therefore, traditional methods do not suit for them. Resource management, while neglecting space management, can be inefficient and result in inaccurate scheduling. It is crucial to ensure that resources are not overused beyond the capacity of the workspace, as this can lead to congestion and hinder the movement of people and materials, ultimately impacting productivity on construction sites. Traditional planning methods often struggle to model spaces effectively on a construction site, focusing more on tasks and constraints. Subcontractors allocate resources to the site and plan their weekly activities accordingly by assigning activities to resources. This approach contrasts with the Gantt/Precedence modeling logic. While resource allocation is crucial, instead of planning resources and ensuring linear resource utilization, Gantt/Precedence involves scheduling activities first, then assigning resources, and finally try to level resource. Conversely, planning teamwork by assigning activities presents a more coherent approach to ensuring consistent resource utilization. The growing need to track and locate the different resources on a construction site has led to the development of many space planning methodologies over the years. This research aims to develop a model that accurately captures the progress of construction operations, enabling linear planning and streamlining project site monitoring. The aim is to enhance scheduling methods for planning building construction projects by proposing and categorizing standardized artifacts for dynamic utilization of construction space, thereby improving the optimization of the operations.

4.3 Background and justification

The management of available space on a construction site directly affects a project duration, costs, and safety (Mawdesley *et al.*, 2002). However, this discipline is often underestimated by project managers (Guo, 2002) and remains a rather difficult and unfamiliar exercise for managers. Moreover, spaces are dynamic and evolve over time according to the various phases of the project (Francis & Morin-Pepin, 2017), making each construction project unique. Therefore, it is difficult to establish a universal method for managing spaces (Mawdesley *et al.*, 2002). This is why the management of space on the site is left to the discretion of the project manager and

his superintendent (Akinci & Fischer, 2000). The latter is poorly equipped and tries to resolve space use conflicts by direct negotiation on the site in response to specialized contractors' and suppliers' space needs. This mode of operation regularly results in unnecessary movement of materials, equipment, and workers, increasing the risk of accidents and injuries and contributing to lost time and productivity as well as increased conflict. Francis (2015) stressed that what is not modeled cannot be managed properly, and any model must allow to identify the sources of problems and even be able to anticipate them. To remedy this situation, several researchers have studied space management, better known under as space planning.

Based on the type of use (work, storage, circulation), Riley & Sanvido (1995) described the behavior of these spaces according to the nature of the work performed. Whereas, Winch & North (2006) proposed defining spaces based on their state of occupation (free, occupied), Zouein & Tommelein (2001) did so based on their physical changes during the execution of the activity, and Frandson & Tommelein (2014) did so based on the stakeholder needs. This led Francis & Miresco (2006) to develop the chronographic modeling, which is centered in part on the concepts of space planning and the need to develop management and planning applications that are better suited to the construction industry. Its main attraction lies in its graphical capacity to present useful information to the construction project manager. From its conceptual framework and graphical protocol (Ardila & Francis, 2015a,b; Francis, 2013, 2019), a series of tabular and graphical models is proposed that generates displays adapted to various types of projects, specialties, and the range of situations that can arise during a construction project.

Graphical representations of spatial planning, oriented towards the linearization of resource management, offer a platform more suited to the detection of spatial conflicts. Indeed, the impact of spatial congestion, or relaxation, on planning is a well-known problem in the construction field. Already in 1989, Sanders *et al.* (1989) estimated a loss of efficiency of about 65% due to space congestion. Despite the frequency of these conflicts, the industry still does not consider the available space when planning future work (Akinci & Fischer, 2000). Akinci *et al.* (2002a) sought to formalize the analysis of spatiotemporal conflicts and to develop a procedure for classifying and prioritizing them. These conflicts are analyzed in four (4) steps : i) detection of conflicts in

the production model, ii) aggregation of conflicts, iii) categorization of aggregated conflicts, and iv) prioritization of aggregated conflicts. Subsequently, Akinici *et al.* (2002a) described a formal way to automate the determination of schedule impacts of time-space conflicts and predict the behaviors of interfering activities and schedule those behaviors' impacts given a spatial conflict.

Guo (2002) combined MS-Project and AutoCAD to develop a process for detecting and resolving space conflicts on the construction site. According to him, the CAD system allows managers to specify prioritization criteria to perform and detect space conflicts from the planning and propose a solution in the project CAD plans. This decision-support system allows managers to solve this complex problem more efficiently and with more precision. Chua *et al.* (2010) proposed a methodology that distinguishes between several classes of conflicts. They mainly sought to show the links between space conflicts and congestion on construction sites. To do so, they introduced two (2) indicators that can be used as a complement to 4D-CAD analyses : i) the dynamic space interference, which allows for quantification of the interference when conflict arises between activities, and ii) the congestion penalty indicator, which allows for the evaluation, analysis, and comparison of the feasibility of several timelines. Mirzaei *et al.* (2018) developed a new approach that dynamically detects spatiotemporal conflicts. First, the crew workspace is determined by their movements within the various sectors. Subsequently, this information is inserted into a 4D-BIM simulation to detect, calculate, and dynamically display the position and size of conflicts between work crews during construction.

4.4 Goal, objectives and limitations

4.4.1 Needs and justification

The increased ability to model the available space allows managers to plan workflows more effectively, minimize resource movement, optimize space utilization, and improve safety on construction sites. Researchers have focused on the detection and resolution of space conflicts by mean of mathematical or graphical models, static or dynamic. According to our knowledge of the state of the art, to date, none of them have categorized or standardized visual artifacts to represent

the workflow, static or dynamic, of the various occupation types (OT) at the site. Therefore, a standard protocol is necessary to facilitate the modeling and communication of the position and the space required by resources through the schedule. Artifacts that can schematically show a static and dynamic representation of the site occupancy rates of construction operations, allowing construction managers to model, plan, and optimize spaces, thereby avoiding congestion or zone relaxations by promoting linear and uniform production.

4.4.2 Research goal and objectives

The primary objective of this research project is to enhance scheduling methods for planning building construction projects. This will be achieved by developing a methodology to construct a dynamic spatiotemporal representation of the occupancy rate (OR). This project is intended to develop a graphical protocol for modeling site occupancy rates based on information that managers can easily obtain when planning a construction project, so an empirical approach based on design-science concepts was developed. The mission of design science is to develop knowledge that the professionals of the discipline in question can use to design solutions for their field problems (Van Aken, 2005). Based on procedural methodologies and spatiotemporal chronographic modeling (Francis, 2004, 2016, 2020), these models will allow the calculation and anticipation of spatiotemporal occupancy rates of construction sites and use it as a leveling factor to ensure optimal utilization of available indoor and outdoor spaces during the planification phase. The aim is to create and analyze the dynamic model of the occupancy rate schedule and identify over- and underutilized sectors.

The primary strength of the proposed method lies in its capacity to generate a dynamic schedule that not only captures the construction timeline but also models the spatiotemporal changes in the OR of the construction site. This integrated approach aims to introduce an additional layer of information, specifically the occupancy rates, to the construction schedule, all while minimizing the burden on already busy construction project managers.

Thus, the key objective of this paper is to formulate and classify standardized artifacts tailored for dynamic optimization of operations, emphasizing on the improved utilization of construction site space. These artifacts, presented schematically, must effectively and clearly represent both construction operations and the spatial allocation of resources. This clarity enables project managers to make well-informed decisions, optimizing the construction process and enhancing overall productivity.

4.4.3 Research Methodology

To achieve this objective, the design of the artifacts demonstrated in this paper follows the analytical method presented by Hevner *et al.* (2004). Based on this, the research methodology specifies the following steps : (i) Information gathering and static analysis of the construction operations and their space requirements ; (ii) parameters for the Occupation Rate (OR) calculation ; (iii) modeling of static artifacts and calculation to graphically represent the different occupancy and operation type (iv) validation of created artifacts through workshops. The following four sections will explain this methodology in detail.

4.4.4 Research constraint and limits

This study is limited to building construction projects, and the user must have excellent knowledge of construction processes, specifically construction techniques and management used by specialized contractors. Plus, at the time of this writing, no prioritization process has been defined in the event of a conflict between the critical path on a CPM/Gantt and if the occupancies rates are too high.

4.5 Information gathering and static analysis of the construction operations and their space requirements

In order to define the information and parameters needed for the calculation of occupancy rate, as well as information breakdown structure (IBS), an empirical approach was used. This approach consists in gathering information during the construction of real project. Therefore,

three (3) projects were used as reference : the renovation of a luxury hotel in Montreal, which took place in 2016; the construction of a new pavilion; and the renovation of the library of the École de Technologie Supérieure (ÉTS), which took place between 2017 and 2019. On the reference projects, weekly takeoff of the entire construction site, supported by sketches and photos, was done (Morin Pépin & Francis, 2019). The objectives were to understand the links between the available space in each sector and the space required by the work teams to execute the operations and the key challenges that construction project managers faced in managing the spaces were also identified. Given that enhancing the planning quality of construction projects is a key objective of this research project, an empirical methodology was employed. The initial phase involved on-site visits to gather data on the positions and spatial occupancy of everyone and everything participating in the construction process. To achieve this, three specific projects were chosen for takeoffs and analysis.

The first was the renovation of the Fairmont Queen Elizabeth Hotel in downtown Montreal. This project was chosen because of the vast scale of the required demolition while keeping the structure intact. The second project was the reconstruction of the ÉTS's library. It was chosen because the work had to be done while there were still students around. The final project was the construction of the new pavilion of the ÉTS. A five (5) story building that includes offices, workshops for student clubs and classrooms. Those construction projects were a good opportunity to collect a good variety of data on the position and the occupation of everything that can occupy space during a building construction process. Weekly takeoffs, supported by sketches and photographs of the entire project (Morin Pépin & Francis, 2019), were done. Then, the pictures were analyzed (Figure 4.1 left), and the space occupied on the construction site, during the takeoff, were transcribed on the plan of the project (Figure 4.1 right). Those transcriptions were then analyzed to determine the qualitative and quantitative parameters discussed in the two (2) next sections.

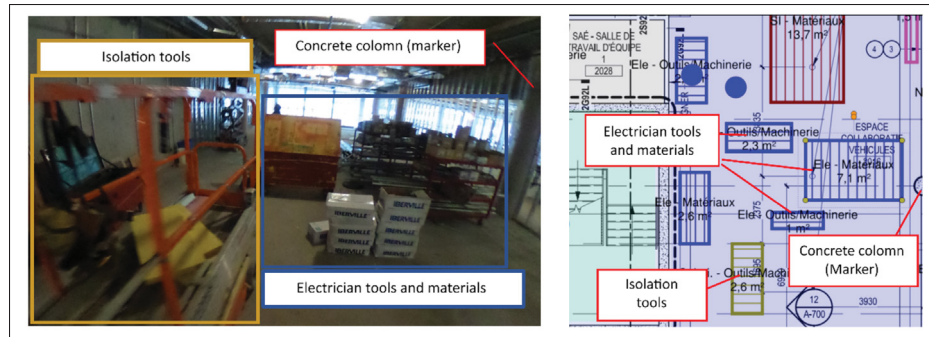


FIGURE 4.1 left : takeoff picture, right : plan representation of the same picture

4.5.1 Qualitative analysis

On a construction site, the resources can be of five (5) types ; 1) workers 2) materials, 3) tools, 4) machinery, and 5) reverse cycles. So, one of the first objectives of this research is to know how these five (5) resource types are used during daily operations on a construction site. During the processing and analysis of these takeoffs, the positioning of the resources was linked, if possible, to the task that uses them. However, once present on the site, it proved difficult to follow the progress of some of them, specifically the materials used by the work teams, which also occupy space when they carry out work. So, it was noted that it was necessary to classify all the items occupying space on a construction site according to their uses. These “space-occupying” items have been named Occupation Type (OT). Then, the Occupation Type Breakdown Structure (OTBS) was developed to act as a framework to organize all the information and properties of the OT. From there, it was possible to determine and manage every property that has an influence on the space occupied by an OT. The three (3) main properties that were identified are the owner, the resources type and their inclusivity, which indicates the effect that each of them has on the sector in which they are positioned and is discussed in section 4.7.1.

4.5.2 Quantitative analysis

The next step was to determine and calculate the quantitative portion, i.e., the space occupied by each type of occupancy. Since many OTs contain one or more types of resources, this means that

the dimensions of many OTs can be determined directly from their resources. was developed, thus linking the physical properties of a sector to the work teams, allowing the calculation of the space required by each work team. However, it is different for the work teams, their dimensions cannot obtain and calculated directly, and given the highly mobile nature of the operations, their occupations cannot be determined solely by the size of their resources. Their occupation depends more on the physical size of the sector where the work is done than anything else. So, to determine this, two parameters are needed : i) the internal location and ii) internal displacement. The internal location refers to “where” in a sector the work is done, basically, on the floor, the walls, or the ceiling. Then, the internal displacement specifies the movement the work team will make inside the sector. Will they work on an entire surface (installation of the gypsum board), in a linear way (plumbing and HVAC) or punctual (electrical fixture)? The methodology based on those two (2) parameters, presented in Morin Pepin & Francis (2018), and applied in sections 4.6.1.3, was developed, thus linking the physical properties of a sector to the work teams, allowing the calculation of the space required by each work team.

4.6 Parameters for the Occupation Rate (OR) calculation : Definition and parameters

This section defines the required parameters for the calculation of the OR. We examined and studied each takeoff to identify parameters associated with sectors, occupancy types, and operations. Subsequently, we constructed the information breakdown structure (IBS) based on these findings, which serves as a consistent framework throughout this research. Some data, such as the total length of walls and the maximum available area, can be obtained directly from the plans. Others are static such as sectors. Some others are dynamic, such as accessibilities, and circulations. All those parameters must be determined by the manager based on the planning.

Four (4) possible accessibility options for a sector were identified : i) open, ii) restricted access, iii) temporary closure and iv) not accessible (Figure 4.2) Each of them will impact the design and modelling of the artifact differently. An “open” sector is the least restrictive accessibility parameter. That means that the sector can be assigned to anyone without additional accessibility constraints, using standard security equipment required to access the whole construction site.

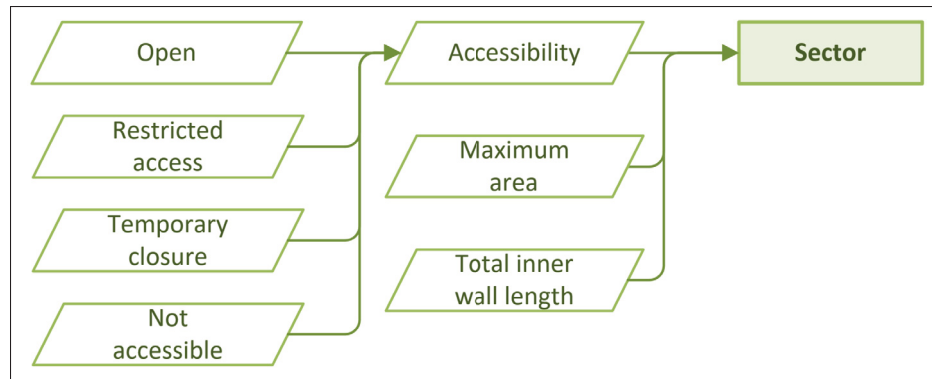


FIGURE 4.2 Sector types and parameters

In this situation, the entire area and length of the walls are available for the calculation of the OR. “Restricted access” imposes additional safety constraints on the sector. A good example is areas requiring a safety harness due to the risk of falling or closed areas where a gas sensor must be worn to gain access. In this situation, the entire surface area and length of the walls are available for the calculation of the OR but under certain specific conditions. A “temporary closure” involves making the area temporarily inaccessible. For example, work could be done in a corridor, blocking the entrance to some sectors, or on the floor, making it necessary to wait for a certain period before anyone can walk on the floor again. In this situation, although no work crew is present, the area will be fully occupied (OR = 100%) and included in the OR calculations. Finally, the setting of “not accessible” is used in situations in which a sector is inaccessible. An example would be a large opening in the floor where extensive preparatory work, such as scaffolding, will be required to make the sector accessible. Inaccessible areas are therefore not included in the occupancy calculations.

4.6.1 Occupation Type (OT)

When calculating the occupancy rate, we identify and classify the OTs using the type of construction operations that will occupy the space. This distinction is made because it is necessary to categorize and reserve the required space based on how the task will progress inside the sector or, in the case of material, the occupation of the space. For this purpose, the OT

breakdown structure (OTBS) is proposed (Figure 4.3). The OTBS comprises four (4) categories :
1) general occupation, 2) storage, 3) operations, and 4) permanent occupation.

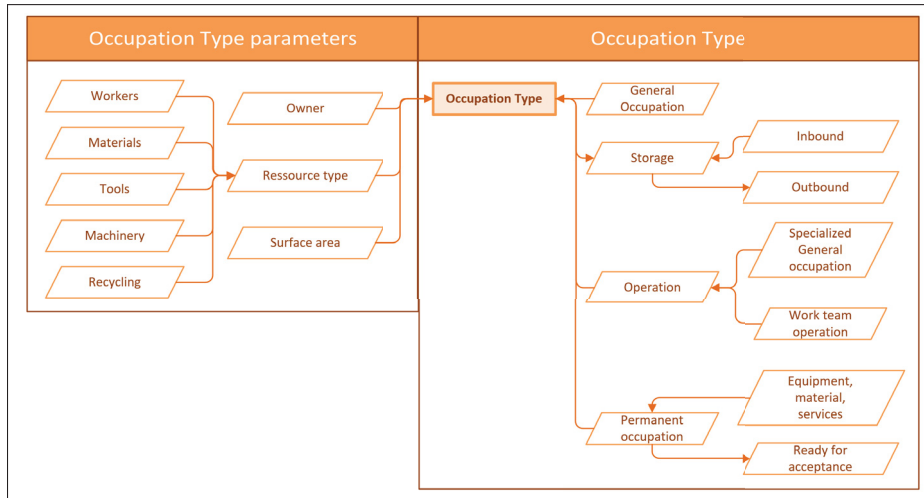


FIGURE 4.3 Occupation types and parameters

4.6.1.1 General occupation

The first OT category concerns the items and resources required for the management and general operation of the construction site that cannot be assigned directly to a single operation. The general contractor's site trailer, temporary stairs, lifting and handling equipment, and reception areas are good examples of general occupation.

4.6.1.2 Storage

In the construction of buildings, tools, machinery, materials, waste, and/or reused and recycled materials must be stored on the job site before they are used (inbound) or taken off the job site (outbound). Therefore, any resources awaiting use or permanent installation are placed in interim storage.

4.6.1.3 Operations

The management team's primary task is the coordination of the construction operations, usually subcontracted for a building project. The quality of this coordination will directly affect the project quality, deadlines, and costs. In the planning of the work, any lack of space to perform operations will impact the progress of the work and the overall schedule. Therefore, the operations, which include work crews, tools, machinery, and materials, are characterized by the three (3) parameters, shown in Figure 4.4. The first is the Work Breakdown Structure (WBS), which identifies each of the tasks to be executed. The next two (2) parameters, internal displacement, and internal location, will be used to determine the space that has to be reserved in each sector where the operations are performed, as identified by the WBS. The combination of these two (2) parameters results in nine (9) internal OTs that can be reserved for each operation (Morin Pepin & Francis, 2018).

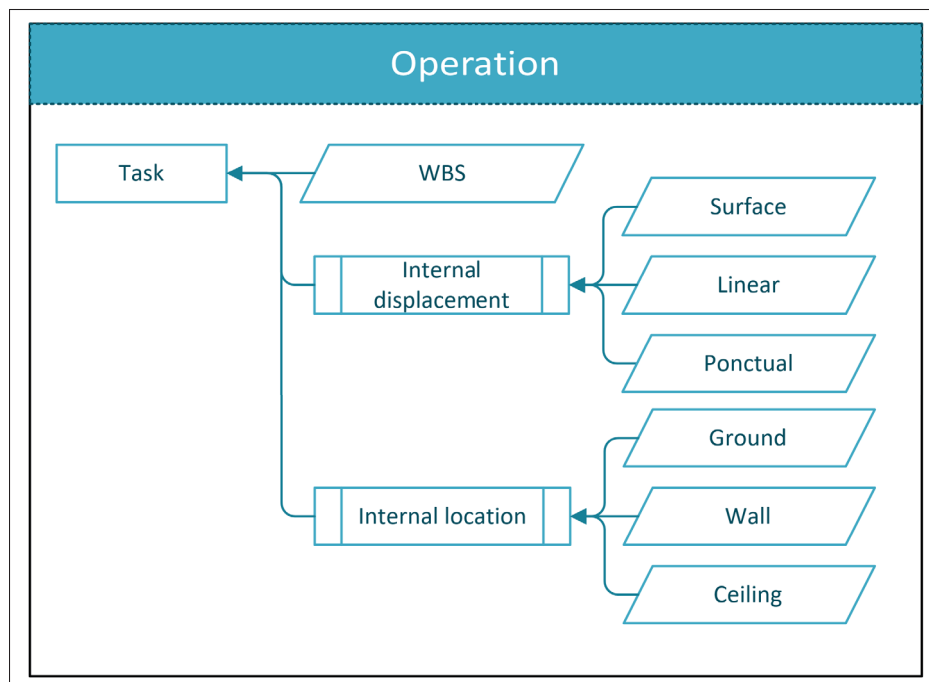


FIGURE 4.4 Parameters of the operations

4.6.1.4 Permanent occupation

As the operations progress, the installation of the various components in their final location will result in a permanent decrease in the available space on the site. This is referred to as permanent occupation. There are two (2) situations that can cause this decrease in available space : i) installation of equipment, materials, and services and ii) partial acceptance of the building sectors. In the context of the installation of equipment, materials, and services, even if work in the concerned area is not complete, the space occupied by this OT will no longer be available for the remainder of the construction phase. A link to the product breakdown structure (PBS) and the service breakdown structure (SBS) can help construction managers determine which OT will be using this space. Since construction is not complete, those areas are still included in the OR calculation. As the construction of the building progresses, mainly toward the end of the construction period, the work will eventually be completed in certain sectors. It is important to mark these sectors as no longer accessible, primarily to avoid damage to the finished sectors. These areas will be indicated as ready for acceptance. This OT occupies all the available space in the areas for the remainder of the construction period. Therefore, when this type of occupancy occurs, the sectors are no longer included in the calculation of the OR.

4.6.2 OT parameters

Following the identification of the OTs, each of them must be characterized by the parameters shown in Figure 4.4. Therefore, for each OT, it will be necessary to indicate the owner and the type of resources. The surface area will be calculated using the two (2) methods described in the next section.

4.7 Modelling of static artifacts and calculation to graphically represent the types of occupancy and operation

The first step in calculating OR is to determine the occupied space in each floor or zone. Two (2) methods for calculating the OR for an OT are proposed. The detailed method offers the ability to calculate a more accurate occupancy rate. For this, artifacts were specifically designed to

visualize, interpret, and analyze the information and parameters that all the resources will use on the site and, most importantly, the space they will occupy. However, it requires a great analytic effort from the manager. To counter this problem, a simplified and more practical method is proposed, which relies partly on the manager's experience.

4.7.1 Simplified method

With the simplified method, rather than conducting a detailed analysis based on artifacts, the project manager directly determines the space the OT occupies. The calculation of the occupation of each sector by OT is based on the inclusivity parameter identified in Figure 4.5. The purpose of this parameter is to indicate whether other OTs may be present in the same area at the same time. Therefore, in the simple method, the area an OT occupies will depend directly on its inclusivity parameter.

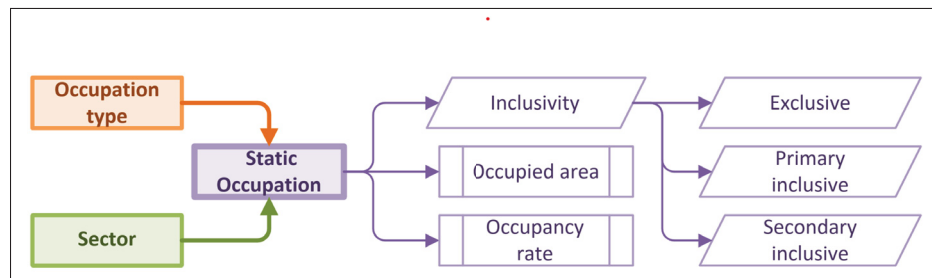


FIGURE 4.5 Properties of static occupations

When an OT is exclusive, no other OT can be present in the area at the same time, so it will occupy all the available space ($\%ot = 100\%$). In the case of a primary inclusive OT, the OT has priority in the area, and it will be assigned the most of the available space. Finally, when an OT is secondary inclusive, it is not a priority in the sector and will be assigned less space. The primary and secondary inclusive values are determined by the project manager when planning the project, with the primary inclusive taking most of the available space and the secondary inclusive taking the rest. For example, a project manager could specify for a primary inclusive OT an OR representing two thirds of the available space in a sector ($\%ot = 67\%$). The secondary inclusive OT will then occupy a third of the available space in a sector ($\%ot = 33\%$). So, a sector

with one primary and one secondary inclusive OT would be fully occupied, and a sector with two (2) primary inclusive OTs would be over-encumbered, with a total OR of 134%.

4.7.2 Detailed method

Generally, in construction, overlapping works are not allowed. Thus, the space occupied by any work on a site can be measured in occupied floor area, i.e. in m^2 . So, in the detailed version, the area an OT occupies will be calculated in m^2 using a more detailed analysis of the OT. Specific artifacts and matching equations were developed to represent some of the situations that could arise. It should be noted that the main purpose of this paper is the presentation of the artifacts. Because once the artifact has been determined for a task, the manager will then have to design the equations that will calculate the OT for that artifact. Figure 4.6 shows how the available and occupied space will be represented on the following artifacts.

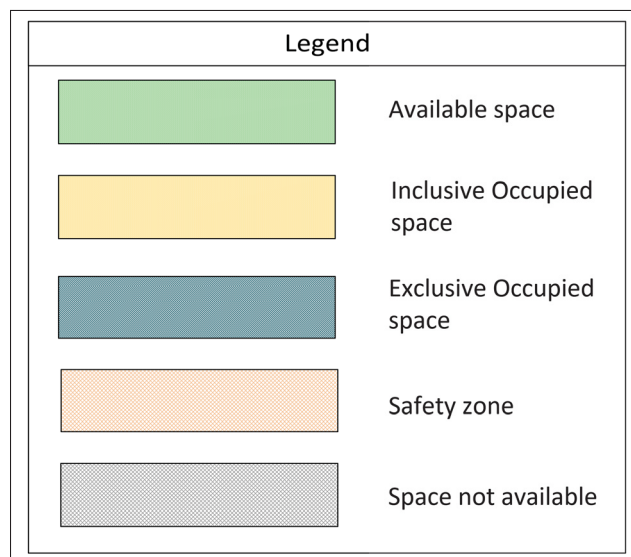


FIGURE 4.6 Legend for the artifacts

4.7.3 Exterior work, excavation, and superstructure

Excavation and superstructure works are among the first important works of the project, and they alone occupy a large part of the available area on the construction site. Usually, the space

$$S_{ot} = (W_b + 2W_{ot} + 2W_{sec}) \times (L_b + 2L_{ot} + 2L_{sec}) \quad (4.1)$$

Area for excavation and superstructure

occupied for this work is larger than the footprint of the building alone, to which must be added the safety zone because of the great risk these types of work generally cause. Therefore, in the artifact shown in Figure 4.7, the area the OT occupies can be determined by adding the extra length (L_{ot}) and width (W_{ot}) of the safety zone ($W_{sec} = safetywidth$ and $L_{sec} = safetylength$) to the dimensions of the future building to be constructed ($W_b = width$ and $L_b = length$). Equation 4.1 allows us to calculate the area that the excavation and the superstructure teams will occupy.

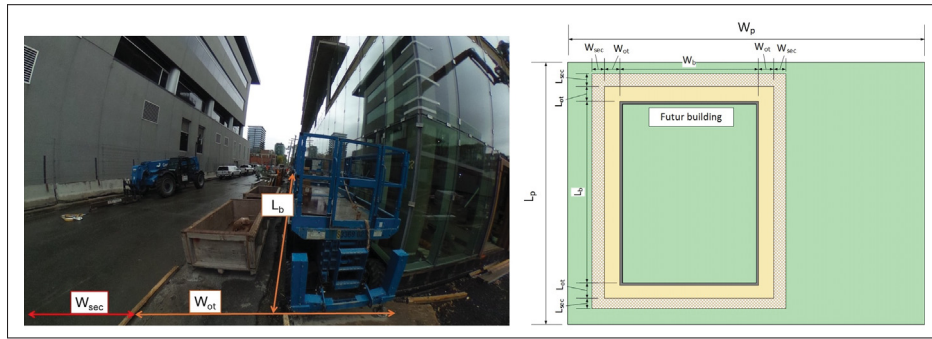


FIGURE 4.7 left : Picture of work on building façade, right :
Corresponding artifact for exterior work, excavation,
superstructure and building façade

4.7.4 Exterior work, building façade

Once the superstructure work is completed, the next step for the exterior work is usually to install the exterior cladding (Figure 4.7-left). As Figure 4.7-right shows, the area this OT occupies will start from the exterior facade of the building and extend outward by the required length and width (L_{ot} and W_{ot}). With the surrounding safety zone (L_{sec} and W_{sec}) added, equation 4.2 can be used to calculate the occupied area at the perimeter of the building.

$$S_{ot} = 2(W_b \times (L_{ot} + L_{sec})) + 2(L_b \times (W_{ot} + W_{sec})) + 4((W_{ot} + W_{sec}) \times (L_{ot} + L_{sec})) \quad (4.2)$$

Area for building facade

$$S_{ot} = \left(\sum_{i=1}^n L_{oti} \right) \times (W_{ot} + 2W_{sec}) \quad (4.3)$$

Area for linear works

4.7.5 Linear work on the floor or ceiling

For linear work on the floor or ceiling (the artifacts for linear work on the walls are presented in sections 4.7.6 and 4.7.7), such as the installation of ventilation ducts (Figure 4.8) and plumbing, the objective is to determine the length of the item to be installed (L_{oti}), which will be multiplied by the width required for the work teams (W_{ot}), to which a safety width (W_{sec}) is added on each side. Equation 4.3 will allow us to calculate the area this type of occupation will occupy.

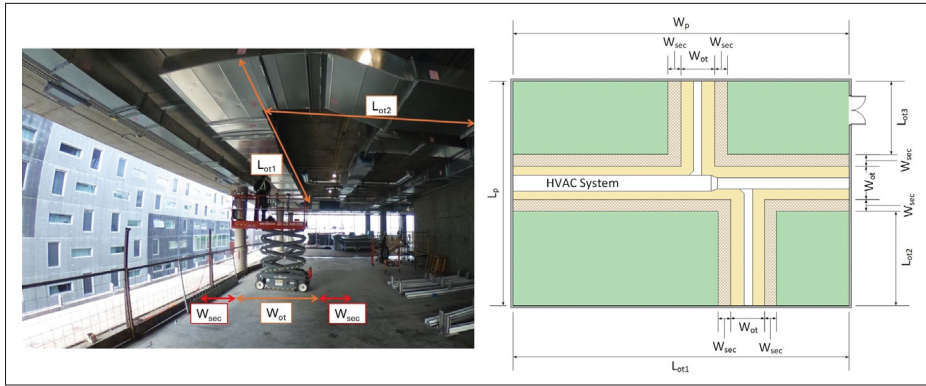


FIGURE 4.8 Left : Picture of HVAC work, right :
corresponding artifact

$$S_{ot} = 100\% \times S_m \quad (4.4)$$

Utilization of the maximum available area

4.7.6 Interior work, maximum area, and perimeter

In some situations, the OT will use all the available floor space in the area, whether it is on the floor, ceiling, or walls. In this case, the area the OT occupies (Figure 4.9) will be equal to the available floor area (S_m) in the space (equation 4.4). However, when the OT involves work on the walls (Figure 4.10), it will be necessary to assign all the walls' distance to the OT (equation 4.5).

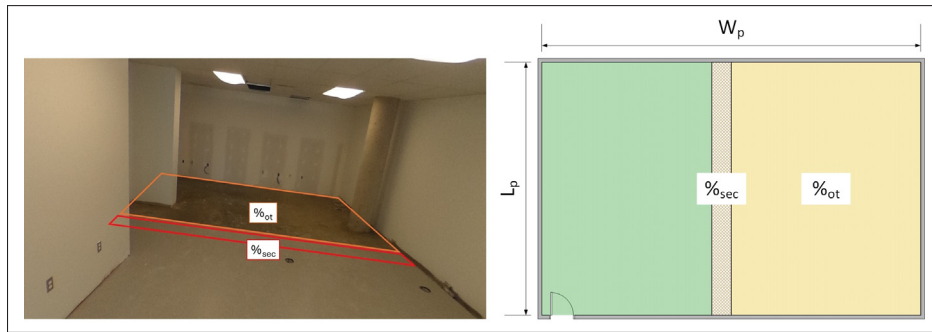


FIGURE 4.9 Left : Picture of work on the floor, right :
corresponding artifact

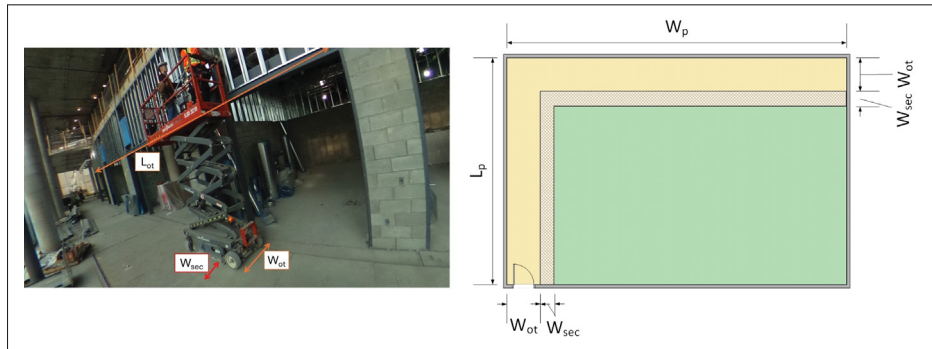


FIGURE 4.10 Left : Picture of HVAC work, right :
corresponding artifact

$$S_{ot} = ((W_{ot} + W_{sec}) \times (2L_p + 2W_p)) - 4(W_{ot} + W_{sec})^2 \quad (4.5)$$

Use of the maximum available wall

$$S_{ot} = (\%_{ot} + \%_{sec}) \times S_m \quad (4.6)$$

Use of a portion of the available area

4.7.7 Interior work, part of the area or perimeter

Although some OT is similar to the artifacts presented in the previous section, it will require only a portion of the floor area, ceiling area (Figure 4.9), or walls (Figure 4.10) available in the sector. For the floor and ceiling, it will be necessary to estimate in advance the portion of the area ($\%_{ot}$) that will be required for the occupation type. By adding a safety zone ($\%_{sec}$), equation 4.6 can be used to calculate the required occupation.

When only a part of the walls is required, it will be necessary to determine which walls the OT will affect. This wall length is then multiplied by the reserved length for the OT (L_{ot}), plus the safety zone (L_{sec}). Equation 4.7 therefore can be used to calculate the area an OT occupies on a portion of the available walls in a sector.

4.7.8 Interior work, use of the dimensions of the OT

Finally, the last possibility to determine the OR of an OT is to use the latter's dimensions (L_{ot} and W_{ot}) directly (Figure 4.11), to which we add the safety zone (L_{sec} and W_{sec}) around it (equation 4.8).

$$S_{ot} = ((W_{ot} + W_{sec}) \times (L_p + W_p)) - (W_{ot} + W_{sec})^2 \quad (4.7)$$

Use of a part of the available walls

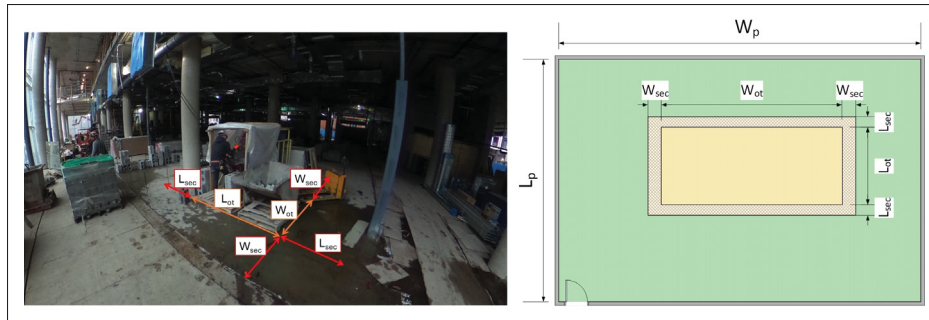


FIGURE 4.11 Left : picture of work on the ground with his dimensions, right : corresponding artifact

$$S_{ot} = (L_{ot} + 2L_{sec}) \times (W_{ot} + 2W_{sec}) \quad (4.8)$$

Occupancy using the dimensions

4.8 Validation of the created artifacts and graphical protocol through workshops

This study was intended to simulate the OTs that may occur during the construction process through artifacts. To validate these artifacts and understand how construction workers and professionals can visualize and interpret the space the work teams and resources occupy, semi-supervised workshops were carried out with the help of an online questionnaire (<https://forms.gle/rEagBmgLJUGZDfgm6>). Participants were shown pictures of specific operations taken during real construction projects and were asked to evaluate the representativeness of artifacts that could represent the task and/or resources shown in the picture.

A total of 24 participants for this workshop, who came from various domains of the construction industry in Quebec, were interviewed. An online (via Zoom or Teams) or live meeting was planned with each participant to help them carry out the workshop.

Before starting the workshop, participants were shown three (3) videos. The first explained the objectives of the research and this workshop. The second explained in detail the legend used for the conception of the artifacts (Figure 4.6) and how the artifacts worked. Finally, the third video presented an example question. These videos were followed by a question period to confirm that

participants had a good understanding of how the workshop worked. Once the workshop was explained, they were left alone to do the workshop. But we were still available in case they had some questions during the workshop.

The participants were shown 20 photos and descriptions of various operations taken from real construction sites, some standard and some more ambiguous. For each of these photos, the participants had to evaluate the representativeness of three (3) proposed artifacts that could represent these operations. Like it was said in section 4.7.2, the main goal of this paper is the conception of the artefacts. So, it was decided to not include the corresponding equation for the proposed artifacts, so that the participants could focus only on the artifacts while doing the workshop. The representativeness was evaluated with the help of a Likert scale from one (1) to four (4) : 1) unrepresentative, 2) rather unrepresentative, 3) rather representative, and 4) representative. Participants could also express appreciation and suggest improvements.

Fig 4.12 shows that most of the participants (91%) work or have worked for a general or a specialized contractor and therefore have directly worked on a construction sites, and 9% came from architecture and engineering firms. Of the 24 workshop participants, eleven (11) worked for a general contractor and a specialized contractor. Regarding the educational level, Figure 4.13 shows that 63% (15) had a bachelor's or master's degree, 13% (3) a college degree, and 17% (4) a vocational diploma.

The Figure 4.14 shows four (4) operation and storage situations. The first one represents The installation of the windows support for the mechanical room on the roof. Three (3) artifacts could be considered : i) assign the outside of entire perimeter of the room (artifact 1), just one wall (artifact 2), and just the window on which they are working on (artifact 3). The participants considered the first artifact the most representative (88% indicated this artifact is “rather representative” or “representative”). The second situation represented two workers on their own nacelle installing the HVAC ducting system. Because of the risk of falling objects, the three artifacts considered were linear work (artifact 1), separate teams (artifact 2), or fully inclusive (artifact 3). The participants considered the first artifact the most representative

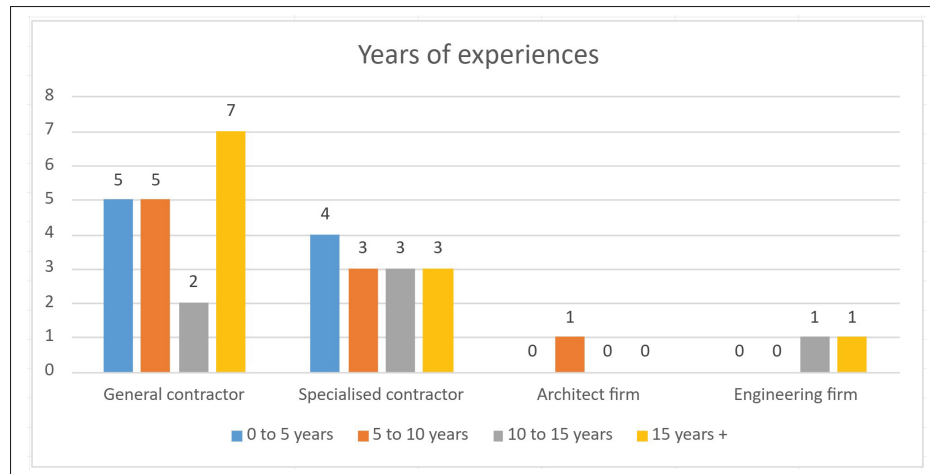


FIGURE 4.12 Years of experience of the participants in each domain

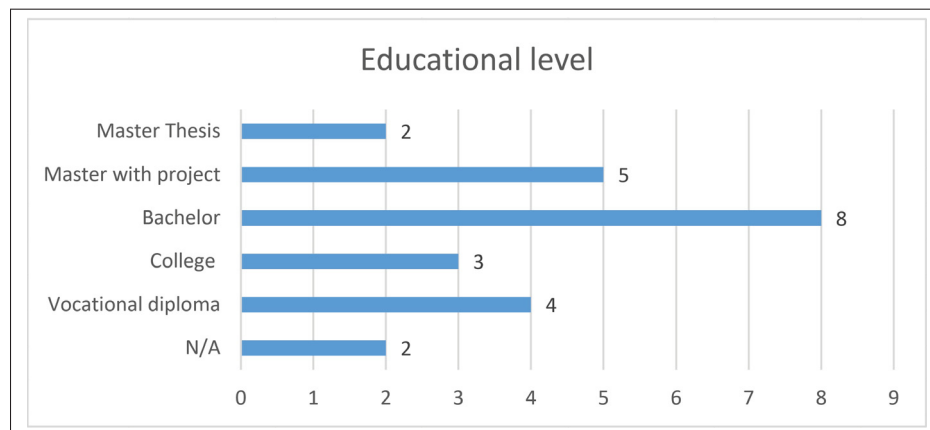


FIGURE 4.13 The participants' educational level

(50% representative and 38% rather representative), followed closely by the third artifact (25% representative and 50% rather representative). Data concerning the second artifact is inconclusive, with 59% considering the artifact “rather unrepresentative” or less and 41% “rather representative” or more. The third situation represents the installation of a cinder block wall. It should be noted that the concrete saw and mixer were not in the same sector as the work team. Because of the concrete work, the considered artifacts were the area fully exclusive (artifact 1), both sides of the wall set as occupied (artifact 2), and considering only one side of the wall

occupied (artifact 3). Artifact three (3) was the most representative; 67% of the participants considered it “representative.” 71% of the participants considered the second artifact “rather representative.” Finally, the first artifact is not representative because 58% of the participants said it was “rather representative” or less and 42% “rather representative” or more. Finally, the fourth example situation represented the presence of scaffolding. Technically, work could be done under and around it. Artifact 2 is considered the most representative of the three; 76% of the participants considered it “representative” or “rather representative.” The data regarding artifacts 1 and 2 were inconclusive, with 46% considering them “rather unrepresentative” or less and 54% “rather representative” or more. The purpose of this workshop was to validate the main artifacts’ parameters to represent the site occupancy : i) the OT positioning, ii) the inclusiveness, and iii) the legend. This workshop information was taken from a real construction project. For each situation, three (3) artifacts were created using a variation of those parameters. Since this research project is mainly intended for professionals, obtaining their opinions, priorities, and vision was important to validate the artifacts’ parameters. The schematization of the presented situations allowed the participants to evaluate the importance of the parameters discussed during the workshop. All the artifacts presented in chapter 4.7.2 were used in at least one of the 20 presented situations, and each of them was considered the most representative in at least one situation. These validation results confirm that the parameters used for the creation of the artifact are representative of how the space is occupied by the work teams and all the resources that can be present during the construction phase. However, the suggestions made during this validation allowed us to make some adjustments, especially in the work carried out inside the walls, such as installing plumbing pipes, installing insulation, and installing a curtain wall. Initially for these situations, it was planned to reserve the workspace on both sides of the wall where the work is carried out. However, following the workshop, it turned out to be more representative to reserve workspace only on one side of the wall where the work is done.

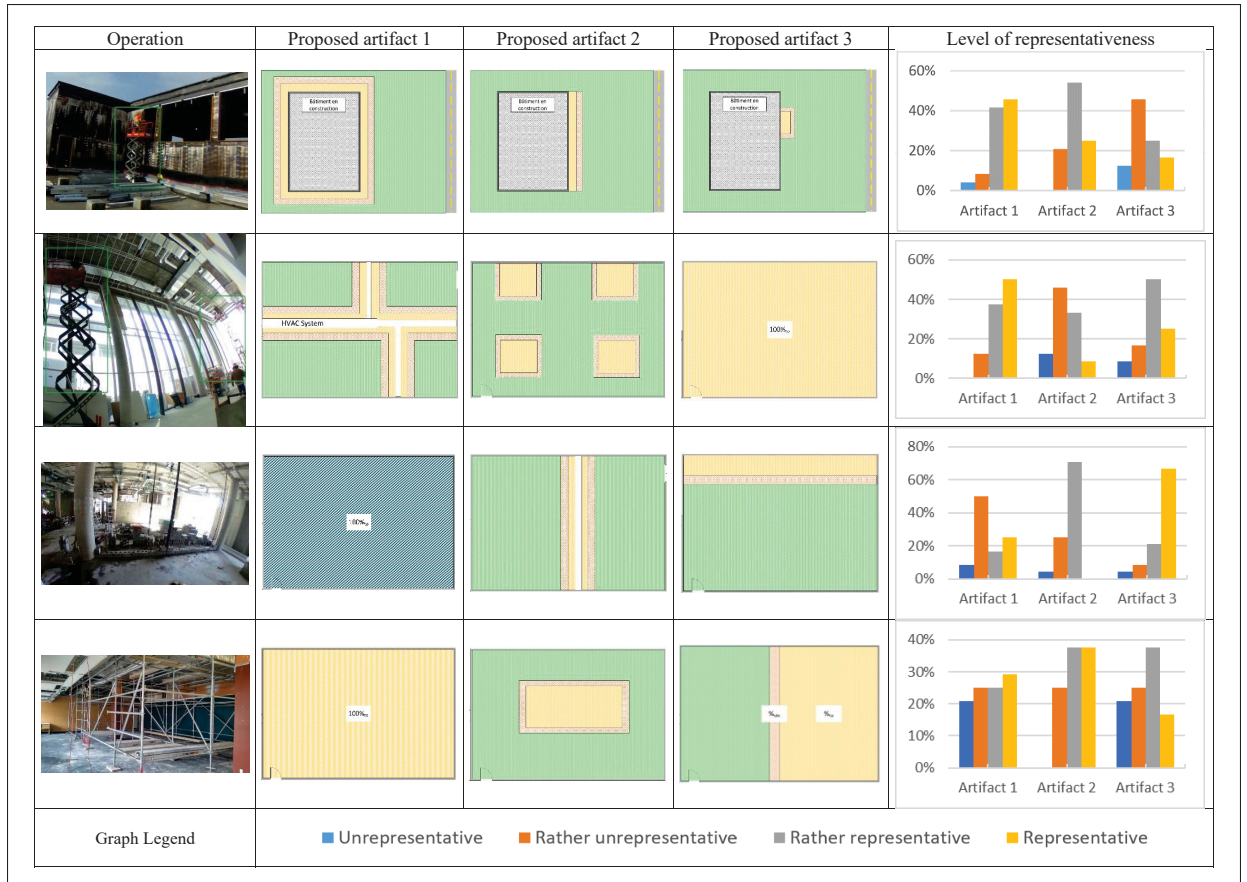


FIGURE 4.14 Partial workshop results

4.9 Conclusion

The proper management of the available and occupied space in a construction site is essential to ensure an effective workflow during a building project's construction phase. However, construction project managers lack the proper tools to manage this space upstream of the construction phase, possibly leading to a relaxed or an over-encumbered site, increasing the risk of accidents and creating sub-optimal schedules. Space management therefore contributes to producing more realistic and better-optimized deadlines. It facilitates the identification and calculation of the spaces occupied by all the OTs that will be present during construction at a given time. To do this, this document includes the parameters that will be necessary to characterize the sectors of a given construction stage. Then, two (2) methods for calculating the

space occupied by the OT are proposed. A simplified method that draws on the experience of the project manager to prioritize OTs and determine their priorities, and a second, more detailed method. The latter method uses a series of artifacts to accurately calculate the occupancy of each OT. Although it requires more time and calculations, this second method offers better space optimization results. Note that it is almost impossible to create artifacts for every situation that may arise on a construction site. To remedy this situation, artifacts are created to allow design flexibility. Thus, the manager can use the same concepts to create artifacts adapted to particular situations. The semi-supervised workshops organized, with the construction professionals, helped also to identify the best artifacts to represent certain ambiguous situations. Despite their advantages, the proposed methods have their limitations. One of the main challenges arises from the additional effort needed to identify all the OTs and determine the space each of them will need. However, since they use information that should already be available to the project managers, it should help mitigate the gap and even facilitate the management of the OT.

CHAPITRE 5

PLANNING THE EVOLUTION OF THE SECTORS OF A CONSTRUCTION PROJECT OVER TIME WITH THE DYNAMIC LOCATION BREAKDOWN STRUCTURE

Stéphane Morin Pépin¹ , Adel Francis¹

¹ Département de génie construction, École de technologie supérieure,
1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article publié dans le cadre de la conférence « ICCCB2024 » en août 2024.

5.1 Abstract

Contractors continually face the challenge of efficient space management on construction sites, as neglecting this crucial aspect can result in reduced productivity due to congested areas, unnecessary resource movements, and increased safety risks. The goal of the Dynamic Modelling of Occupancy Rate Schedule (DMORS) is to leverage the spatiotemporal visualization capabilities of Chronographic Modelling, by providing contractors with a planning system that seamlessly integrates construction scheduling and dynamic modeling of site occupancy rates. This entails the ability to dynamically visualize and plan both indoor and outdoor areas available during construction and gather all the necessary information pertaining to these areas for DMORS calculations. From a sector perspective, the construction of a building can be broken down into several key stages, each necessitating its own allocation of space. In this research, we introduce the Dynamic Location Breakdown Structure (DLBS) to plan the allocation of available space into functional sectors based on the specific needs of the construction project. The DLBS empowers construction managers to utilize building plans and analyze the work schedule to determine the evolving status of sectors available during construction. Subsequently, once the DLBS is established, we present a methodology for extracting essential information required for DMORS occupancy rate calculations.

5.2 Introduction

In a study of several construction companies, Whitman, Deshpande, Zech & Perez (2021) 69% of respondents indicated that the development of the site use plan began prior to the submission period. Whitman *et al.* (2021) also point out that 71% of respondents were creating multiple site use plans, thus suggesting that managers in construction recognize the benefits of a well-organized site.

Over the years, several studies have proposed solutions to enable project managers to manage the layout of their site. Tommelein (1989) and Tommelein *et al.* (1991) developed the SightPlan to investigate whether artificial intelligence could assist in the design of a development plan, which allowed them to better understand the process of designing a development plan. Also, many studies use mathematical algorithms to "optimize" the positioning of development plans such as genetic algorithms (Philip *et al.*, 1997; Mawdesley *et al.*, 2002; Zouein, Harmanani & Hajar, 2002; Farmakis & Chassiakos, 2017), neural networks (Yeh, 1995), bee (Yahya & Saka, 2014) and ants (Ning *et al.*, 2010). However, this research focuses only on temporary installations.

Ideally, the planning phase should also include the management and positioning of all the resources and work teams that will be present during the construction phase. This is the main objective of space planning, which began with the work of Thabet & Beliveau (1994) and Riley & Sanvido (1995, 1997). Subsequently, Kenley & Seppänen (2009) with the Location Based Management System and Francis (2004, 2016); Francis *et al.* (2019) with Chronographic Modeling proposed complete solutions for space planning. Morin Pépin & Francis (2024), then used the capacity of the space-planning to proposed methods for calculating the space occupied by the resources. However, this brings the problem of the management and planning of the available sectors, because the majority of solutions allowing space-planning use a static definition of the available sectors in order to plan the works commonly known as the location breakdown structure (LBS). As a solution, Francis (2019) added a layer system to manage the dynamic representation of the sectors when creating a schedule using the Chronographical Modeling. Focusing only on the interior sectors, he suggests 5 layers, namely, i) the creation of

spaces (e.g., addition of new floors); ii) the systems (e.g., ventilation ducts); iii) the division of spaces (e.g., partitions); iv) the finishing (e.g., painting); and v) the closing of spaces (e.g., carpet laying).

5.3 Research objectives

The main objective of this research is to use the capacity of the space-planning to improve planning techniques for building construction projects. This will involve the creation of a methodology to construct a dynamic spatiotemporal representation of occupancy rates (OR). The objective is to establish a graphical protocol based on chronographic modeling to model the spatiotemporal occupancy rates of the construction schedule, using readily available information for project planning purposes Morin Pépin & Francis (2024). To do this, an empirical approach based on design science concepts was adopted. By nature, the construction of a building is a very dynamic operation. Not only in terms of the movement of workers and resources, but also in terms of space and available sectors. As mentioned in the introduction to this article, there is currently no system in place to effectively monitor this dynamic evolution of sectors. The objective of this paper is to improve the layer system proposed by Francis (2019) by proposing the Dynamic Location Breakdown Structure (DLBS), a methodology that allows a dynamic representation of the entire project using chronographic modeling. With the proposed methodology, the manager will be able to represent the dynamic evolution of all the sectors necessary to build the construction schedule of the entire project, of the interior and exterior sectors and for all levels of the building.

5.4 Dynamic Location Breakdown Structure (DLBS)

Done during the planning phase, i.e. before construction begins, one of the challenges for a schedule built using the space planning technique, is to determine in advance all the sectors that will be needed during the construction phase. DLBS works by creating a series of interior and exterior layers for each level of the building. As shown in the Figure 5.1 a good place to start is to look at the project plans where each of the floors will contain its own set of layers.

The dynamic aspect is represented by a series of layers that contain the division of the sectors required for the construction phase represented by the layer.

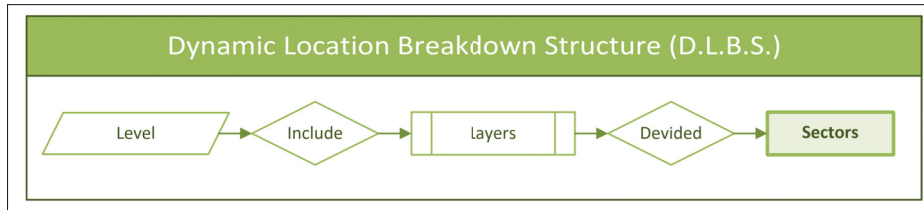


FIGURE 5.1 Structure of the Dynamic Location Breakdown Structure

5.4.1 Layers

Since each construction project is unique and has its own peculiarities in terms of layout, it is impossible to determine a fixed structure for the succession of layers. However, the suggestion of a succession of the layers of the Figure 5.2 presents the layers that should be present on the majority of construction sites for a building. This structure can be easily modified to represent the needs of the site, such as adding a layer that would represent temporary areas for specialized contractors or adding a layer for the installation of machinery during the construction of an industrial plant, or by removing external layers if jobs are run only indoors. Typically, when constructing a new building, a contractor starts with a blank field. So, the first layer will be for the preparatory work that needs to be done before starting the construction process, such as deforestation, demolition, installation of security fencing and construction trailers, etc. The next layer is for excavation work, which is usually the first work done, followed by the structural layer, for the foundation and superstructure. Each floor added during the construction of the superstructure will have the effect of creating new spaces, which are usually interior. In order to represent this new situation, the layers separate into external and internal layers. This distinction is necessary because for most of the construction phase, the work done inside the building is independent of the work done outside. This approach allows the project manager to isolate the evolution of the internal sectors from the external sectors.

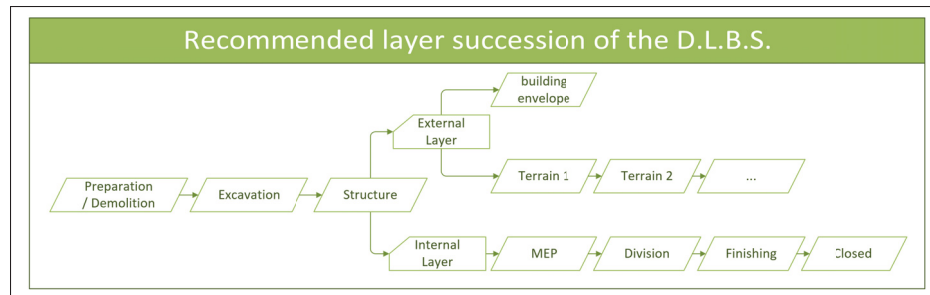


FIGURE 5.2 DLBS recommended layers succession

The external layers are divided into two sets of layers, one for the building envelope and one for the terrain. While the external layer for the building envelope is likely to remain similar throughout construction, the sectors on the terrain can, and will, change regularly during construction. For this reason, the manager can create as many "terrain" layers as necessary so that the available space in the field can be adapted to the needs of the site. Finally, the internal layers will consist of a succession of four (4) layers; 1) MEP, 2) division, 3) finish and 4) closed. This succession represents the general evolution of the work carried out inside the building. Because, once the structure is complete, the next step is to install the entire electromechanics. The division of space usually follows closely, this is where the walls will be built. The "division" layer will therefore be applied as the large open area of a level is divided into smaller rooms that will define the sectors for the rest of the construction. Then, once the gypsum boards are installed, the finishing layer can be applied for paint, flooring, ceilings, lighting, etc. Finally, when the work in a room is complete, the "closed" layer can be applied, indicating that no more work should be required in that area, making it inaccessible.

5.4.2 Dividing a layer into sectors

Several factors and situations will obviously have to be considered for the division of the layers into sectors. Such as the positioning of the temporary facilities necessary for the smooth running of the site, which will have a significant impact on the definition of external sectors, by providing sectors for construction trailers, storage and roads access. For example, Figure 5.3 shows an example of dividing layers into sectors that could be applied to a fictitious project. Another

challenge when the superstructure is completed is that a floor is finally available to start the electromechanical work. Because, depending on the needs and the order in which the MEP work will be carried out, a manager will have the choice of treating the floor as a single large sector or separating this open area into sectors without there being any physical demarcations present. The use of benchmarks, such as the positioning of ventilation ducts, could be a good starting point for identifying these areas. Subsequently, as the divisions are constructed, the building rooms will serve as the basis for the internal sectors that will be used for the rest of the site, and thus for the division, finishing and closing layers. However, in order to optimize the succession of work teams, it may be necessary to divide some rooms that are too large into several smaller areas. So the challenge is to find their optimal sizes. A manager could therefore organize their sizes to ensure that the time it takes to complete tasks is similar from one sector to another.

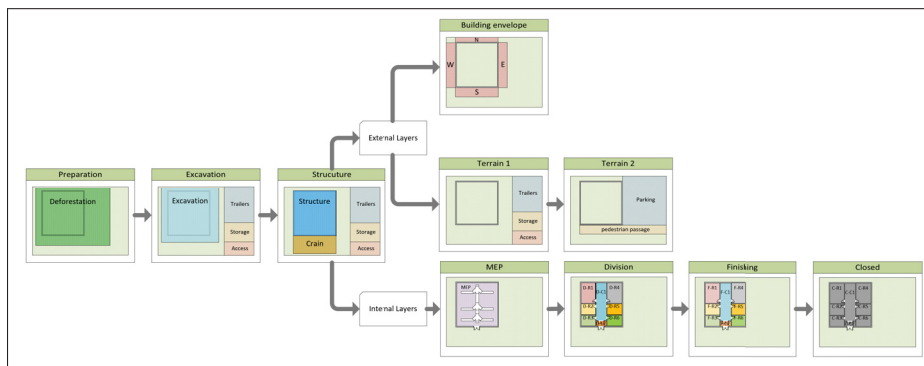


FIGURE 5.3 DLBS sectors divisions

5.5 Sectors Parameters

The dynamic spatiotemporal calculation of the occupancy rate is based on the establishment of several parameters at the sector level. Thus, another objective of the DLBS is to be able to dynamically determine and manage these parameters, which are identified in Figure 5.4. Thus, for each of the sectors, it will be necessary to be able to determine and/or calculate accessibility, the maximum available area, the occupied area and the remaining area.

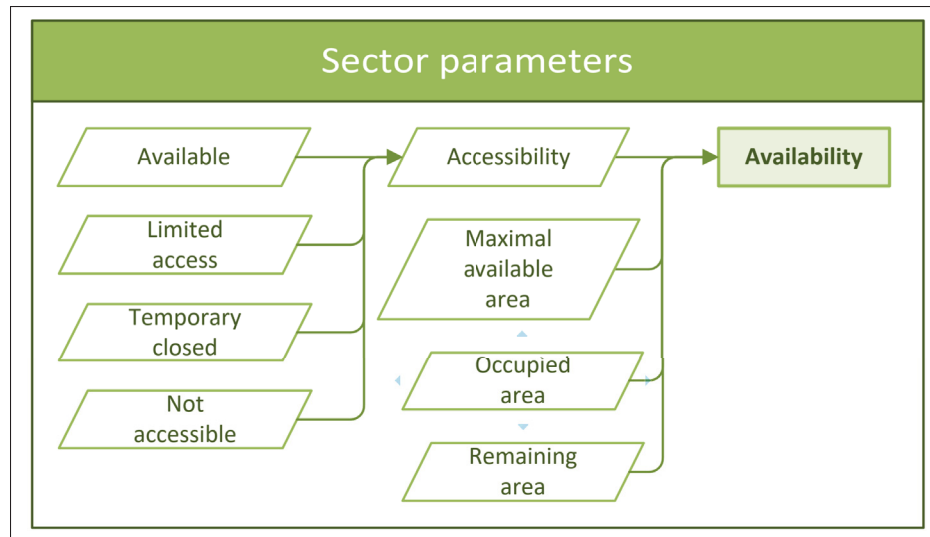


FIGURE 5.4 Sector parameters

5.5.1 Accessibility

A sector can have four (4) accessibility options : i) open, ii) restricted access, iii) temporary closure and iv) not accessible. A sector set as “open”, means that it can be accessed by everyone on the construction site, using standard security equipment. “Restricted access” imposes additional safety constraints on the sector. A good example is a closed areas where a gas sensor must be worn to gain access. A “temporary closure” involves making the area temporarily inaccessible. For example, an epoxy floor finishing where it is necessary to wait for a certain period before anyone can walk on the floor again. Lastly, the designation of “not accessible” is applied when a sector cannot be reached. For instance, this could involve a sizable gap in the flooring that necessitates significant preparatory measures, like erecting scaffolding, to render the sector reachable.

5.5.2 Area management

Area management is the key element that allows a schedule using dynamic spatiotemporal calculation of the occupancy rate to work well. The maximum available area can be obtained directly with the project plans. Subsequently, the "Occupied area" parameter allows you to

manage the space occupied by the Occupancy Types (Morin Pépin & Francis, 2024) as they are added and removed in the sector. This will ultimately calculate the "Remaining area" parameter by subtracting the "Occupied area" from the "Maximum available area".

5.6 Conclusion

This article is part of a research project that aims to develop a methodology for the dynamic spatiotemporal calculation of the occupancy rate of a construction site. It proposes the DLBS, which allows project managers in the construction industry to carry out dynamic planning of the sectors that will be present during the construction phase. First, DLBS is presented which suggests a cutting structure based on the main stages of the construction of a new building. The DLBS creation process uses the project plans on which a series of inner and outer layers will be applied. Each of these layers contains the sectors to be applied for the job phase corresponding to that layer. As the project progresses, these layers will be gradually applied to redefine the areas that will be available. This makes it possible to define a series of properties for each of these areas, such as accessibility, maximum available area, occupied area, and remaining area. For future research, it will be necessary to develop a complete solution in order to integrate the DLBS into the dynamic spatiotemporal calculation of the occupancy rate of a construction site. This will make it possible to apply it and study its application on real construction projects.

CHAPITRE 6

A DYNAMIC SPATIOTEMPORAL SCHEDULING FOR CONSTRUCTION BUILDING PROJECT

Stéphane Morin Pépin¹ , Adel Francis¹

¹ Département de génie construction, École de technologie supérieure,
1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article publié à la revue « Building » en octobre 2024.

6.1 Abstract

For building projects, the manager is responsible for coordinating the work of subcontractors at the construction site. This includes operations, material flows, and storage. In summary, one of their main roles is to ensure smooth team rotation, maintain fluid circulation, and avoid congestion or relaxation on the site. However, traditional tools lack the ability to consider the planning and management of worksite spaces when calculating the execution schedule and critical path. Consequently, three-week planning is usually carried out separately on independent plans, often using spreadsheets. In addition, a construction site is highly dynamic and mobile in nature, and the positioning of resources and workers can change daily. This makes the management of available space even more complex, and effective space management becomes an imperative. To address this challenge, this paper introduces a methodology and a conceptual framework for the calculation of the Occupancy Rate (OR) that enables construction project managers to create simple yet dynamic spatiotemporal models of the construction schedule. By incorporating factors such as crew turnover and occupancy evolution, managers can simplify the calculation process and effectively optimize construction work by utilizing site occupancy rates. In summary, this paper introduces the Dynamic Model of the Occupancy Rate Schedule (DMORS), a methodology created using design science methodology. The DMORS enables managers to calculate occupancy rates for different floors and sectors of a site, allowing for better space management. A proof of concept demonstrate that this tool can enhance the efficiency

and productivity of construction projects by optimizing crew schedules and resource allocation based on site OR.

6.2 Background and Justification

Construction project planning techniques primarily use Gantt-Precedence logic to model activities and their dependencies. The Gantt-Precedence diagram defines activities on a time scale, allocates resources, and handles constraints. However, several limitations make this method not well-suited for scheduling and management of building construction site. These limitations, include imprecise precedence logic with the reverse critical path, potential congestion, overlooked space utilization, and site traffic and complex graphics rendering highlighted difficulties in visually interpreting dependency lines due to their density and overlap.

The nature of buildings project makes the site construction a dynamic process, workers are constantly on the move, materials are delivered and used, and machine goes in and out of the construction site (Riley & Sanvido, 1995, 1997; Thabet, 1992; Thabet & Beliveau, 1994). Riley & Sanvido (1995) has partially represented and categorized this dynamic aspect of the construction sites. However, as the work progresses, the available space tends to decrease, making it difficult to access it.

Linear diagram methods provide partial solutions by ensuring resource linearity, making them suitable for linear projects like infrastructure but less effective for complex building projects with many unique activities. Repetitive models, which handle recurring tasks across multiple units or floors, are more apt for vertical and horizontal building projects. They calculate specialty team requirements based on the duration and total time available for tasks. Combining repetitive modeling with space planning methods improves efficiency by linking spatial and temporal aspects, promoting optimal site usage, and ensuring efficient workforce rotation. Space planning is crucial as construction involves workers moving to different sites, unlike manufacturing where work comes to the workers. Neglecting workspace considerations can lead to site congestion and conflicts.

Spatiotemporal planning emerges as a more suitable scheduling model because it concurrently considers activities, resources, and spaces. Akinci & Fischer (2000) noted that the majority of trade contractors know the space they will need for future work. They also mention that there is no system that allows the general contractor to collect this information and integrate it into the work planning, so they cannot consider their spatiotemporal needs when designing the construction schedule. To remedy this problem, they discussed a generic model that would collect spatiotemporal information on the working methods of trade contractors. Still according to Akinci & Fischer (2000), such a model would offer two (2) advantages : (i) study the space required for each working method and (ii) the possibility of reusing the same spatiotemporal information for all activities that use the same working methods.

Guo (2002) have combined Gantt and AutoCAD to develop a process for detecting and resolving space conflicts on the construction site. According to them, this CAD system allows managers to indicate prioritization criteria in order to dynamically perform and detect space conflicts arising from planning and propose a solution on the project's CAD plans. This decision support system therefore makes it possible to solve this complex problem more efficiently and accurately.

Mallasi (2006) raised four (4) specific issues in spatiotemporal planning : i) representation of execution strategy, ii) simulations of construction progress, iii) three-dimensional workspace planning, and iv) analysis of spatiotemporal connections. He developed Critical Space-time Analysis (CSA), which is a reasoning mechanism that minimizes the criticality of spatiotemporal conflicts. He introduced the concept of "workspace competition" to minimize congestion between activities. The evaluation of the CSA is done with the help of PECASO, a prototype application that uses a multi-criteria function to assess the severity of conflicts. The objective of its PECASO-CSA approach is to make managers aware of spatiotemporal planning and to improve their confidence when using 4D simulations to communicate the construction schedule.

Chua *et al.* (2010) have proposed a methodology that distinguishes between several classes of conflicts, they mainly seek to show the links between space conflicts and congestion on construction sites. To do this, they introduced two (2) indicators that can be used as a complement

to 4D-CAD analyses : i) dynamic space interference (DSI) which quantifies interference when there is a conflict between activities and ii) congestion penalty indicator (CPI) which evaluates, analyzes and compares the feasibility of several schedules.

Bansal (2011) mentioned that geometric and semantic information are essential for workplace planning. In addition, having a 3D model of the building with its surroundings, doing a 4D simulation and having the ability to do geospatial analysis in a single platform, this model can be an important asset to design planning by work location. So, he integrated GIS with 4D simulations to create a 3D-GIS environment. According to the author, this environment makes it possible to identify and resolve space conflicts, from the design of plans to construction planning, changes in planning are then made in the 3D-GIS environment directly.

Said & El-Rayes (2013) developed the Congested Construction Logistics Planning, a model that uses genetic algorithms to optimize the use of interior space in a building under construction. According to them, this model helps minimize logistics costs while minimizing the impact of material storage on the construction schedule. The genetic algorithm is used to optimize four categories of variables : i) material procurement, ii) material storage plans, iii) positioning of temporary facilities, and iv) planning of noncritical activities. In a later search, Said & Lucko (2016) identified two (2) gaps in site planning research. First, the concept of margins is not well defined in the research and, second, there are no measures to quantify the availability of workspaces. In order to remedy these shortcomings, Said & El-Rayes (2013) have determined margins on work and productivity teams in order to develop and calculate a new margin that allows measuring the flexibility present in the planning by work location.

Mirzaei *et al.* (2018) have developed a new approach, which they believe can dynamically detect spatiotemporal conflicts. First, the workspace of the teams is determined by their movements within the different sectors. Subsequently, this information is inserted into a BIM-4D simulation in order to detect, calculate and dynamically display the positioning and size of conflicts between work teams during construction.

However, most of these space planning optimization processes rely on deterministic or stochastic optimization techniques, which are not sufficiently viable for application to construction schedules. The multitude of parameters involved makes purely algorithmic optimization impractical.

Kenley & Seppänen (2009); Kenley & Seppänen (2010) and Olivieri *et al.* (2018) have proposed the Location-based management system (LBMS) which aims to ensure that tasks are carried out in a continuous flow. The advantage of a schedule using LBMS is to have a clear representation of the sequence of work, to visualize the sectors available on the site and to directly observe the effect of deviations on the progress of the work. The LBMS focuses on observing work teams evolving through the different sectors of the site. Francis & Miresco (2016) Set that the focus is no longer on the critical path, but rather on production efficiency. The network set the Point-to-Point relation that takes into account : i) external logic, to make the links between the activities that follow one another in a sector and ii) internal logic that makes it possible to calculate the duration of an activity based on the quantities and the rate of production. This facilitates schedule optimization which is done using the following tools (in order) : i) change the production rate by changing available resources, ii) change the production rate by changing the scope of work, iii) change the location sequence, iv) change the team sequence and v) divide tasks.

For its part, chronographic modelling is focused on the concepts of Space Planning and on the need to develop management and planning applications better adapted to the field of construction. Its main attraction lies in its graphic ability to present useful information for the management of construction projects. From its conceptual framework and graphic protocol (Ardila & Francis, 2015a,b). The result is a series of tabular and graphical models generating displays adapted to different types of projects, various specialties and all situations that may arise during a construction project. The spatiotemporal timelines thus produced are designed specifically to meet the needs of each stakeholder of a construction project, adapting the visualization to facilitate the monitoring of the project by displaying the right information, clearly and precisely (Francis, 2013; Francis & Morin-Pepin, 2017).

Effective management of space and movement on a construction site is crucial for ensuring the smooth progress of work. To achieve this, a system based on dynamic spatiotemporal representations of the site is a promising solution. Such a system would facilitate the dynamic utilization of space, thereby preventing both underutilization and congestion on the site. However, the development of this system requires a straightforward approach for calculating the occupancy rate and determining which spaces are occupied or available. Although there are existing research projects and systems focused on spatiotemporal representation of planning, as well as those aimed at representing, calculating, and optimizing available space on a construction site, few of these projects address both aspects simultaneously.

Graphical spatiotemporal solutions integrate graphical, procedural, and algorithmic elements. By amalgamating spaces and operations, this approach ensures continuous use of spaces and teams, facilitating linear production. The proposed methodology prioritizes the critical space on the critical path of activities, enhancing scheduling efficiency. This study aims to develop visual dynamic artefacts that present different operation types. The proposed Dynamic Model of the Occupancy Rate Schedule (DMORS) using design science methodology enables managers visualize the position of the work teams and the recourses inside each sector, which permits the calculation of the occupancy rates for different floors and sectors of a site, allowing for better space management. The table 6.1 show different planning methods presented in this literature review and compare their approach to manage several aspects of the space-planning, space occupation and conflict detection. This comparison supports the necessity of considering the occupancy rate and highlight this study's contribution.

TABLEAU 6.1 Comparison of planning methods and their capabilities

Planning methods	Work schedule visualization	Work team location and rotation visualization	Space Conflicts detection	Operation occupation rate on the site	4D Simulation	Modeling different type of operation on the site
Gantt, [21,22]	Yes	No	No	No	Not adapted Do not represent objects in space	No
Gantt and AutoCAD [6]	Yes with Gantt	Partially Transportation optimization process only	Yes Transportation optimization process only	Partially Transportation optimization process only	Partially With CAD software	No
Multi-objective optimization model / logistics planning [10,11]	Yes Linear based method	Partially Linear based method	No	Yes Pre-determine values	No	No
Dynamic 4D-BIM-based approach [12]	Yes with Gantt	Yes With executions alternatives	Yes dynamic detection of conflicts with labor movements in the workspace	Partially Labor workspace only	Partially Gantt linked to BIM3D model	No
Space-planning (Automation) [5]	Yes with Gantt	Partially With 4D simulation	Partially No graphical representation	Partially For specific equipment only	Yes Space-loaded production models 4D simulations	No
Space-planning (Graphical modeling) [1-4]	Yes Own schedule technique	Yes Graphical work-area patterns	Yes Direct observation	Yes Mathematical equations and graphical patterns	No	Yes Graphical work-area patterns
Takt-time [23,24]	Yes Linear planning	Yes Manually drawn on the drawings	No	No	Yes Takt schedule linked to 3DBIM model	No
LBMS [13-15]	Yes Linear planning	No	No	No	Yes LBMS linked to 3DBIM model	No
Chronographical Modeling [16-20,25-27]	Yes Multiple graphical modeling	Yes Several spatiotemporal modeling	Yes Graphical detection	Yes Basis representation on the schedule	Yes Chronographical Modeling linked to 3DBIM model	No
DMORS ([28] and current paper)	Yes With Chronographical Modeling	Yes Specific dynamic artefacts for the work teams and recourses on the schedule	Yes Specific dynamic artefacts for the work teams and recourses on the schedule	Yes dedicated graphical and calculation methodology	Yes Same as the Chronographical Modeling	Yes Visual dynamic artefacts for different operations types

6.3 Objectives and limitations

6.3.1 Research Goal and Objectives

The aim of this research is to develop a construction planning system which combine the graphic capabilities of the Chronographic Modelling (Francis, 2004, 2013, 2019, 2020) and the dynamic calculation of the occupancy rate. Such a system would optimize the space utilization on the job site, while reducing travel and improving safety on construction sites, and improve the integration of the supply chain into the construction process based on Lean methods. This can include accurate delivery planning, effective coordination of different suppliers and subcontractors, and the use of supply chain management platforms.

The main strength of the proposed model is to allow construction managers to anticipate the available and occupied space on the site at the same time as planning the construction. This ability to combine the two, allows managers to obtain additional information, in this case the occupancy rate, while limits increasing their workloads. This paper follows the work presented in Morin Pépin & Francis (2024) which present standard artifacts to represent the static occupation of Occupancy Type (OT) in the different sectors.

Thus, the main objective of this article is to propose a methodology based on dynamic spatiotemporal modelling of the work in order to calculate and anticipate the occupancy rate (OR) of the site. This OR will allow the manager to use it as a criterion for levelling the construction schedule. Based on Chronographic Modelling, the methodology proposed in this article aims to perform a dynamic spatiotemporal representation of the positioning of work teams and resources on the site and to anticipate the space they will need to carry out the work.

6.3.2 Constrains and limits

The proposed system requires a constant collection and processing of a lot of information in order to correctly represent the occupancy rate. It will therefore be necessary to develop a specific application. This will allow, among other things, to test the DMORS on real projects.

Also, it will be necessary to determine a procedure that will allow the tracking of all the changes that occur during the construction and to update the DMORS and compare the planning to the real occupancy rate.

6.4 Research methodology

The methodology used in this research is based on the seven (7) guidelines presented by Hevner *et al.* (2004). It is constituted of the 10 steps that are presented in the figure 6.1. It must be noted that the steps 6.4.1 to 6.4.3 of this methodology were presented in detail in Morin Pépin & Francis (2024), so they won't be aborded in this paper. Also, the step 6.4.7 will be presented in detail in a future publication. So only the step 6.4.4 to 6.4.6 will be discussed in this paper.

6.4.1 Data collection on real construction projects

Weekly takeoff, supported by sketches and by photographing the entire project (Morin Pépin & Francis, 2019), were done. Then, the pictures were analyzed, and the space occupied on the construction site, during the takeoff, were transcribed on the plan of the project.

6.4.2 Static artifacts creation

To enhance the planning quality of construction projects, this research employed an empirical methodology. Has shown in the 6.1, the initial phase involved onsite visits to collect data on the positions and spatial occupancy of all work teams and resources involve in the construction process.

6.4.3 Static artifacts validation

A first validation was carried out with workshops with industry professionals in order to validate the static artifacts that represent the positioning and occupancy that the Occupancy Types (OT) will have in the sector where they are positioned. Once validated, these static artifacts have become an essential part of the occupancy rate calculation process presented in this article, as

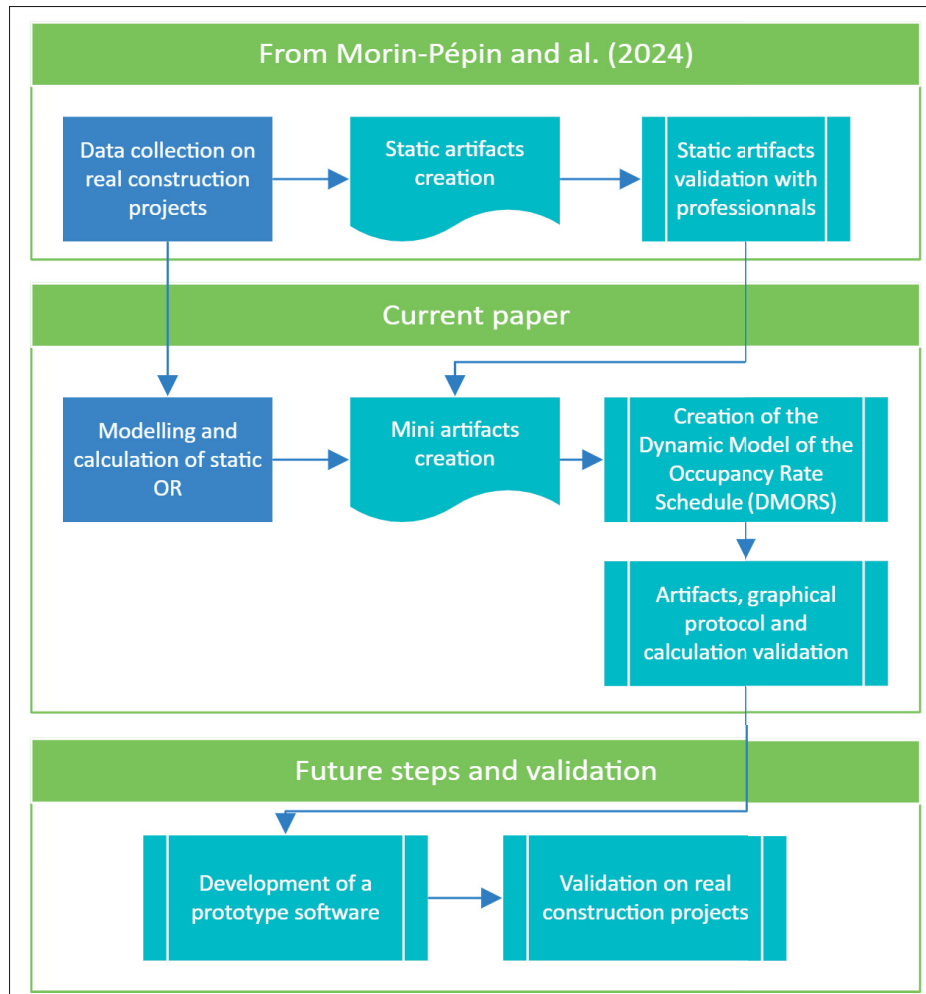


FIGURE 6.1 Research Methodology

they allow managers to visualize the space occupied by the OTs and specify which parameter will be critical to the OR's calculations.

6.4.4 Modelling and calculation of static OR and mini artefacts

The analysis and optimization process begins as soon as the manager positions resources and work teams, called OT in this paper, in a sector, and this process continues as others OT are positioned. It is therefore necessary to display the relevant information that will allow managers to make a proper analysis of the OR. To do this, several levels of OR will be required, starting

with the calculation of an OR for each of the sector individually. This will then allow the calculation of the OR for an entire floor and, then for the entire construction site.

6.4.5 Creation of the Dynamic Model of the Occupancy Rate Schedule (DMORS)

The representation of the dynamic spatiotemporal evolution of the occupancy rate will be done through Chronographic Modelling, by adding the OR as an additional layer of information to the different representations of the Chronographic schedules. For this, a detailed procedure is proposed and mini artefacts where design to represent the OT and the OR on the DMORS. This will add the ability to use this dynamic representation of the OR to visualize and identify the over and under utilize sectors as the project manager built the project's schedule.

6.4.6 Validation of the created artefacts, graphical protocol, and calculation methods through workshops

The validation process was done using the example project shown on figure 6.4. As a proof of concept, a DMORS was made for this project to show the optimization capabilities.

6.4.7 Validation on real construction projects

Finally, following the development of a prototype software, a third validation will take place on real construction projects to test the capacity and effectiveness of the DMORS to optimize the utilisation of available space on the construction sites.

6.5 Modeling and calculation of static occupancy rates (OR) and mini artefacts

The first essential element of this research is to determine and classify all the elements that will occupy space during the construction phase. Resources, like the building materials and the machinery is generally the first thing that comes to mind when we talk about the occupation of the space. But a project manager must also plan and reserve the necessary space needed by the work team to adequately execute their tasks. For this reason, the term OT is used in this research

to include all the items that can occupy space during construction and to calculate the specific OR for each. The procedure presented in this paper uses the parameters of the OT and of the sectors (figure 6.2) to calculate the static and dynamic OR that will enable the optimization of the construction workflow. The first step is to calculate the occupancy rates for each OT and for each of the sectors present on the construction site and, in a second step, to calculate the occupancy rate for a part of the construction site, for example, for a complete floor. The fictitious project, presented in figure 6.4, will be used to demonstrate the calculations in the next sections.

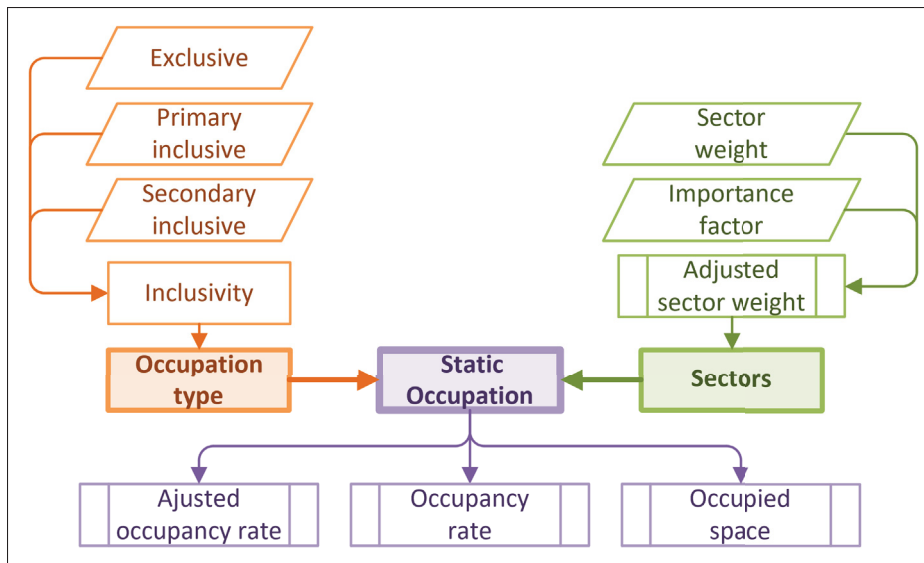


FIGURE 6.2 Properties of static occupations

6.5.1 Inclusivity of an OT

Once an OT is placed in a sector, it becomes a Static Occupation, which allows to determinate and calculate the parameters shown in figure 6.2. The first parameter is the inclusivity, which indicates the priority of the OT in the sector and indicate whether others OT may be present in the same area at the same time. An “exclusive” occupation means that it should be the only OT present in a sector, like the plaster sanding in the example project shown in figure 6.4. An “inclusive primary” occupation means that the OT as the top priority in the sector, but others OT can be present if there is sufficient space. And finally, a “secondary inclusive” occupation as a

$$S_{os} = \sum_{i=1}^n S_{oti} \quad (6.1)$$

Occupied area of a sector

$$\%_{os} = \frac{S_{os}}{S_m} \times 100\% \quad (6.2)$$

Occupancy rate of a sector

lower priority, meaning that if there isn't sufficient space in the sector, this OT should be placed in another sector.

6.5.2 Static occupation

As for the space occupied by an OT, it can be determined in two (2) ways. The simplest is to directly use the dimensions of the OT, as in the example is a bundle of 4ft*8ft (1,2m*2,4m) plywood board that will occupy about $3m^2$. Otherwise, in the context of OTs that represent work teams, the space occupied will often depend on the dimensions of the room in which the work will be carried out. A good example is the installation of the gypsum board on the wall, which depends on the wall perimeter or the installation of the floor tiles, which will probably occupy all the available space. Subsequently, the OR will be obtained by dividing the space occupied by the OT by the total area of the sector in which the OT is located. Note that the adjusted occupancy rate will be discussed later in this paper. The first set of OR to be calculated is the one for each sector present on a floor or a part of the sites. Whether there is only one OT or several in the same sector, as shown in Figure 6.3 where there are four (4) OT, the area occupied by each OT, numbered from S_{ot1} to S_{ot4} , must first be added together to obtain the area occupied (S_{os}) in the sector (Equation 6.1). Next, the occupancy rate ($\%_{os}$) is calculated by dividing this occupied area by the total area of the sector (S_m) where the occupancy types are present (Equation 6.2).

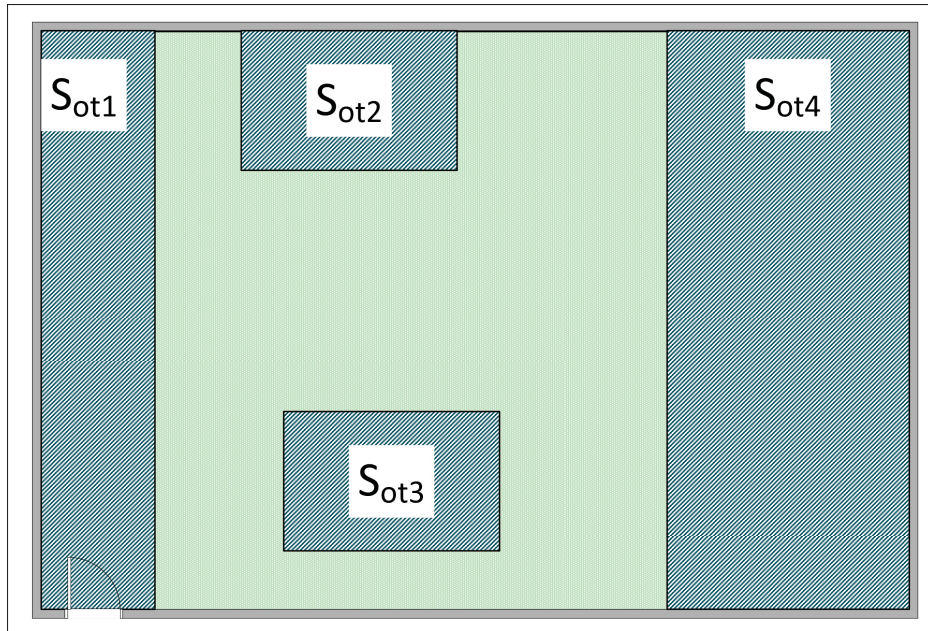


FIGURE 6.3 Area containing several OT

This provides an initial source of information and analysis on the state of the space that should be available on the site. Indeed, if we look at the example DMORS schedule at the Figure 6.13, the sector S7 between the days 32 and 34 is over encumbered with an OR of 123%. This is because, in this sector, there is space reserved for the suspended ceiling installation teams ($129m^2$), the suspended ceiling materials itself ($19,4m^2$), and the recycling container ($10m^2$). Which is more than the available space ($129m^2$). The project manager will therefore have a decision to make and prioritize some of the OT, because they cannot be present in this sector at the same time.

6.5.3 Occupancy Rate for a Part of the Site

The second and last step is the calculation of the occupancy rate for a part of the project. Which depends mainly on the needs of the manager, whether he needs the OR of a floor, a phase, or the project as a whole.

$$\%_{os} = \frac{S_{mi}}{\sum_{j=1}^n S_{mj}} \times 100\% \quad (6.3)$$

Calculation of the weight of a sector

6.5.3.1 Weight of the Sector

During a construction project, not all the sector has the same importance. To indicate this importance, the relative weight of each sector is calculated for the floor where it is positioned. Demonstrated by the Equation 6.3 (where n = number of sectors on the floor), the weight of a sector (W_{S_s}) corresponds to the maximum surface area of the sector (S_m) divided by the sum of the maximum surface areas of all the sectors included on this floor. This will give the relative weight of each sector in relation to that part of the construction site. According to Table 6.2, sector 1 (S1) has a total area of $225m^2$, while the sum of the maximum areas of all the sectors on the floor is $1350m^2$. Thus, the weight of S1 represents 16.7% of the total area of the floor.

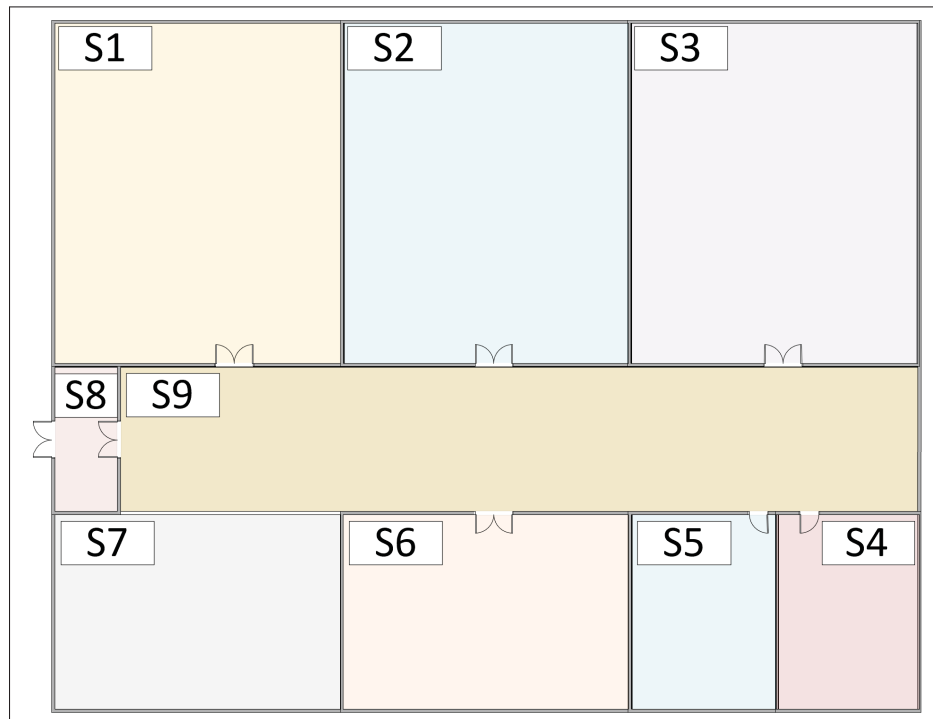


FIGURE 6.4 Example project

6.5.3.2 Importance factor

The weight calculated in the previous section considers that each of the sectors present on the floor has the same importance. However, as mentioned by Francis (2019) some sectors may be more important than others. The manager will determine this importance according to his priorities and the configuration of the floor. An importance factor (If_s) is therefore assigned to each sector. Starting with 1 for the sectors with the lowest importance, the If_s increase as the space represented by a sector is important to the good progress of the work. Thus, in the example presented, sector 8 (entrance hall) and Sector 9 (main corridor) are essential for the circulation of work crews and materials, so their If_s is the highest ($If_s = 3$), while sectors 1, 2 and 3 have an $If_s = 1$, because they are the least important. Note that, for now, there is no limit to the theoretical maximum of the importance factor. It is left to the project manager' discretion to set the maximum limits of the importance factor.

6.5.3.3 Adjusted Sector Weight

This importance factor will then be used in Equation 6.4 (where n = number of sectors on the floor) to vary the weight of the sector (Ws_a) according to this importance. The maximum available area of a sector (S_m) is multiplied by the importance factor (If_s) of that same sector, and then divided by the sum of the multiplication of the maximum available areas and the importance factors of all the sectors available on the floor. The weight of the least important sectors will thus be decreased, while the weight of the most important sectors will be increased. As shown in table 6.2 sector 1, which is one of the least important, as an initial weight of $Ws_s = 16,7\%$ on the floor, ends up with an adjusted weight of $Ws_a_s = 9,7\%$. However, Sector 9, which has an initial weight of $Ws_s = 19,9\%$ and is the most important ($If_s = 3$), gets an adjusted weight of $Ws_a_s = 34,7\%$.

$$Wsa_{si} = \frac{S_{mi} \times If_{si}}{\sum_{j=1}^n S_{mj} \times If_{sj}} \times 100\% \quad (6.4)$$

Calculation of the adjusted weight of a sector

TABLEAU 6.2 Weight of sectors for a part of a building

Sector	$P_m(m)$	$S_m(m^2)$	$Ws_s(\%)$	If_s	$Wsa_s(\%)$
1	60	225	16,7%	1	9,7%
2	60	225	16,7%	1	9,7%
3	60	225	16,7%	1	9,7%
4	32,4	64	9,6%	2	5,5%
5	32,4	64	9,6%	2	5,5%
6	46	129	4,7%	1,5	8,4%
7	46	129	4,7%	2,5	13,6%
8	20	21	1,6%	3	2,7%
9	90,8	268	19,9%	3	34,7%
Total		1350	100%		100%

6.5.3.4 OR for a level, for each period

The calculation of the OR for a certain part of the construction site ($\%_{part}$) is the third step in the process of calculating OR. Whether it is for a floor or the entire construction site, for this step, the Equation 5.5 is used. It will be necessary to calculate the OR of each of the sectors in relation to the desired part of the site (Ws_s). The same equation is used to calculate the adjusted occupancy rate ($\%_{parta}$) by using the adjusted weight (Wsa_s) instead of the regular weight.

Taking sector 1 of the examples Figure 6.13, at day 10 we notice that $144m^2$ of this sector is occupied, representing $\%_{os} = 64\%$ of this sector. However, for the entire floor, this occupancy represents $\%_{part} = 10,0\%$ using the standard weights, or $\%_{parta} = 5,8\%$ using the adjusted

$$\%_{part} = \%_{os} \times Ws_s \quad (6.5)$$

Calculation of the occupancy rate of a sector for a part of the construction site

weights. Finally, the OR for a level is calculated by adding up all the relative occupancy rates ($\%_{part}$ or $\%_{parta}$) of all the sectors on the level. Thus, for this same example, with the adjusted weights, the floor is occupied at 40%.

6.5.4 Mini artefact for dynamic representation

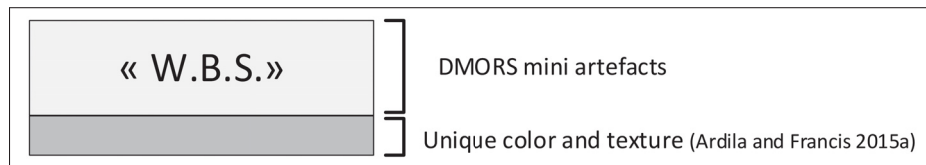


FIGURE 6.5 DMORS mini artefact legend

The Figure 6.5, represent the standard mini artefact used to represent each OT on the DMORS. The upper part is used to represent the two (2) criteria (Morin Pepin & Francis, 2018) : i) the internal location in the sector, whether the work is on the ground, the walls or the ceiling and ii) the internal movement, whether the work occupies the space in the area, or in a linear or punctual manner. The combination of these two (2) criteria provides nine (9) types of space occupancy shown on the Figure 6.6. To make the interpretation easier, the internal location is represented by a trapezoid. So, if the trapezoid is on the side of the mini artefacts, it means that work is done on the walls. It is the same logic, as the trapezoid on the top means that works is done on the ceiling, and on the bottom means that the OT is placed on the ground. As for the internal movements, it is represented by the shape of the background. A fully filled mini artefact, represent an OT that will occupy a large surface area, a rectangle represents linear OT, and a small square represents an isolated OT. Ardila & Francis (2015b) described the standard protocol that will be used for the unique color and texture on the lower part of the Figure 6.5 to help distinguish each OT on the DMORS.

And, finally, as we discuss earlier in this paper, the final parameter to represent is the inclusivity (Figure 6.7), with plain light green representing an inclusive primary occupation, a green striped background for secondary inclusive occupation, and plain dark green for an exclusive occupation.

		Trapezoid		
		Walls	Celling	Ground
Background	Surface			
	Linear			
	Ponctual			

FIGURE 6.6 DMORS upper part legend

Primary inclusive	Secondary inclusive	Exclusive

FIGURE 6.7 Mini artefacts background legend

6.6 Creation of the DMORS and validation

The case study presented in Figure 6.4 was used to test and validate the creation process presented in this paper. The interior of the fictitious building contains a total of nine (9) sectors. It was decided to focus on the interior finishing of the building, since, as the structure of the walls has just been installed, this usually represents the moment during construction when managing the available space and travel is the most important. Thus, the work presented will begin with the installation of the wiring and electrical boxes, followed by the installation of the gypsum panels, the joints, the painting, the electrical finish, the suspended ceiling and, finally, the finishing of the floors. The process to prepare the DMORS, which is presented at the Figure 6.8, is made up of five (5) major steps taking place in succession. First, the start date is selected, and the periods are covered in chronological order. Then, each of the levels available during this period is also covered in order. Thus, it is now possible to determine all the sectors that will be available

on this level during this period and position the OT in every of those sectors. The calculation process presented earlier in this article and the optimization process described in the following paragraph (Figure 6.9) are used to calculate the OR for each of the sectors present on this floor, and during this period. Which leads, finally, to the calculation of the OR for the entire level and for the period.

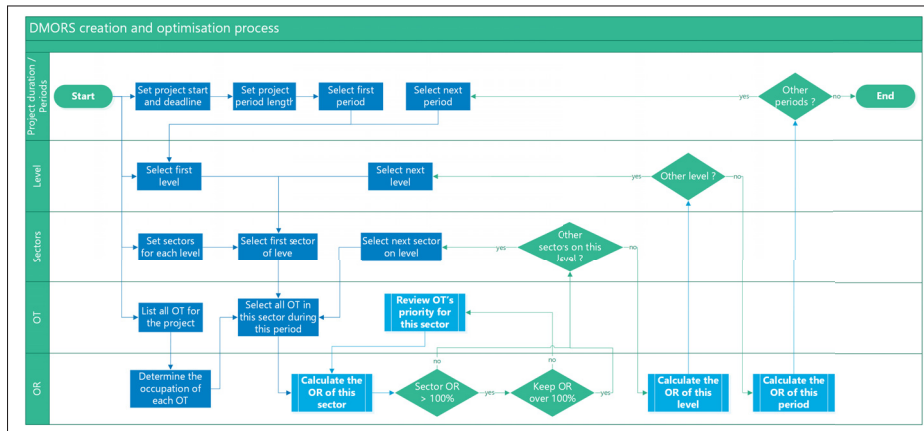


FIGURE 6.8 DMORS conceptual framework

6.6.1 Project duration and periods

The primary goal of a schedule is to use the construction logic to determine the finish date of a project. So, knowing the starting date of the construction phase, the first piece of data that can be determined during the conception of the DMORS is the finish date of the construction. But since this is a fictitious case study, the project start date will be set to zero (0). Selecting the period length will depend on the control the project manager has on the project. But since it's a schedule designed for work coordination, we recommend using periods between 1 day and 1 week. For the case study, each period will represent one (1) business day.

6.6.2 Sectors for each level

Starting from the architectural plans of the project, which are generally divided into floors, the project manager will then have to identify the sectors that will be present on each floor. A good

starting point is to use the rooms on the floor, the walls making good landmarks to identify the sectors. However, in the case of a very large room, it might be counterproductive to think of it as a single sector. In this case, the project manager might want to subdivide this large room into several smaller sectors. This will allow him to optimize the use of the available space in this large room. Subsequently, the inner perimeter of the walls and the available surface area, presented in table 6.2, can be calculated directly on the plans.

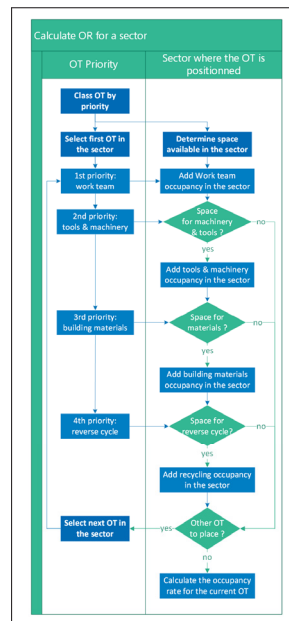


FIGURE 6.9 OR calculations and optimization for a sector

6.6.3 OT

Determining all the OTs for the project will require a little more thought on the part of the project manager. The project responsibility matrix, with the Work Breakdown Structure (WBS) on one axis and the Organisation Breakdown Structure (OBS) on the other, could be a good starting point to identify all the work teams that will be needed throughout the project. Each of them can be represented by a distinctive OT. Each work team will generally need locations, tools, machinery, and materials, which will also be represented by distinctive OTs. The graphical representation (section 6.5.4) can be applied for each of the OTs that will be shown on the schedule, which are summarized in figure 6.10. In order to better visualize the effect that each

OT will have on the sectors, we start with their internal location and movement in each sector where the work will be performed. Subsequently, the inclusiveness of each OT will depend primarily on their priority during the construction process. As an example, it is important to complete the installation of electrical wiring before installing the gypsum panels on the walls. Thus, the installation of electrical wiring will be considered "primary inclusive". However, since the electrical finish usually takes up little space and can be easily postponed without negatively impacting the schedule, it is considered "secondary inclusive". And, because of the dust generated by the plaster and sanding, workers have to wear extra protective equipment to enter the sector. So, the task "plaster and sanding" is considered "exclusive". As for the "floor tiles installation", the processes require the floor to be properly cleaned before the installation, so this task is also considered "exclusive".

6.6.4 OR

To calculate the OR, first the occupation of each OT must be determined (Figure 6.10). There is three (3) way to express the occupation of an OT; i) in square-meter (m^2), ii) in meter (m) and iii) in percentage (%). An occupation expressed in square-meter is for when the size of the OT can be directly used, such as the 4ft*12ft (1,2m*3,6m) gypsum boards which occupy approximately 4,5 m^2 . But for other OT, additional analysis will be required. The project manager will use an occupation expressed in meter (m) for linear work. So, to keep with the gypsum theme, to make sure the gypsum installation team has sufficient space to work, a distance along the inner perimeter of the walls must be reserved, like the 3m proposed in the case study. Finally, a percentage can be used if the occupation cannot be expressed in square-meters or in meter. Like the electrical ceiling finishing which will use about 50% of the available space or the floor tile installation that will use 100% of the available space. Then, the procedure in the figure 6.9 can be applied to calculate the OR of each sector and in the section 6.5.3.4 to calculate the OR for the entire sector for each period.

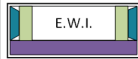
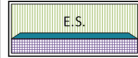
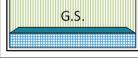
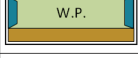
Occupation type	description	internal			Occupation	units	Number of teams	Artefact
		position	movement	inclusivity				
Work team	Electrical wiring installation	Wall	Ponctual	Primary inclusive	20 %		1	
Inbound Storage	Electrical storage	Floor	Surface	Secondary inclusive	2,00 m ²		N/A	
Work team	Gypsum board installation	Wall	Surface	Primary inclusive	3 m		2	
Inbound Storage	Gypsum board and plaster	Floor	Surface	Secondary inclusive	4,5 m ²		N/A	
Work team	Plaster and sanding	Wall	Surface	Exclusive	100 %		2	
Work team	Wall painting	Wall	Surface	Primary inclusive	3 m		1	
Work team	Ceeling electrical finition	Ceeling	Ponctual	Secondary inclusive	50 %		2	
Inbound Storage	Ceeling light	Floor	Surface	Secondary inclusive	5 %		N/A	
Work team	Wall electrical finition	Wall	Ponctual	Secondary inclusive	30 %		1	
Inbound Storage	Electrical finition	Floor	Surface	Secondary inclusive	2,00 m ²		N/A	
Work team	Suspended ceeling installation	Ceeling	Surface	Primary inclusive	100 %		2	
Inbound Storage	Suspended ceeling	Floor	Surface	Secondary inclusive	15 %		N/A	
Work team	Floor tiles installation	Floor	Surface	Exclusive	100 %		2	
Inbound Storage	Floor tiles storage	Floor	Surface	Secondary inclusive	4 m ²		N/A	
Outbound Storage	Recycling	Floor	Surface	Secondary inclusive	10 m ²		N/A	

FIGURE 6.10 OTs for the case study

6.6.5 DMORS creation

The initial creation of the DMORS is mainly done using the same procedure as for Chronographic Modeling (Francis, 2013, 2015), and by applying the mini-artifacts in Figure 6.10. This will generate the schedule presented in Figure 6.11 and Figure 6.12. It will then be possible to display the occupancy that each OT will have in the area where they are positioned and to calculate and display the OR by period, for each sector, for each floor and for the entire project, thus giving the schedule presented in Figure 6.13.

6.6.6 Optimization

For a given period, each sector of the project has a list of OTs that must be positioned. The manager must therefore prioritize the OTs present. The DMORS optimization process is based on two (2) elements : i) prioritization of the OTs present in a sector/period to calculate the OR (Figure 6.9) and ii) what to do if a sector's OR is greater than 100%. Then, when calculating the OR for a sector, the OTs are positioned successively according to this prioritization by validating if there is enough space in the sector before positioning the next OT. In the event that there is not enough space to position an OT or the OR of the sector is greater than 100%, the manager will have to choose between leaving positioning as is and accepting that this sector will be overused or review the prioritization of OTs and moving the lower priority OTs to another sector.

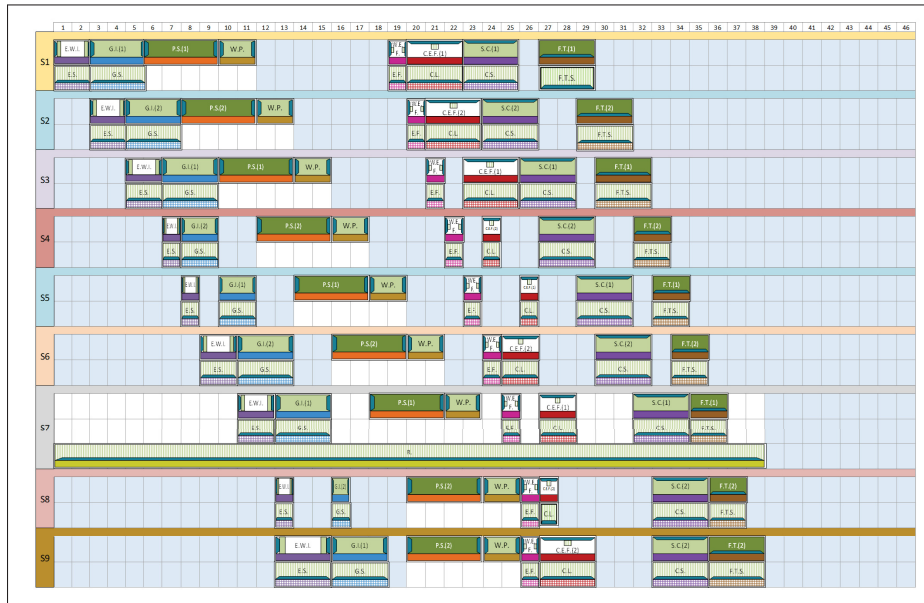


FIGURE 6.11 Chronographic Modeling Schedule for the case study

6.7 Discussion

Effective management of space in construction projects is critical to ensuring efficient workflows, reducing congestion, and optimizing resource allocation. This study introduced the Dynamic Model of the Occupancy Rate Schedule (DMORS), which brings together space planning

principles and dynamic spatiotemporal modeling to address limitations in traditional construction management tools. The DMORS offers project managers a novel means of scheduling that includes dynamic visual representations of space occupancy, providing an enhanced capability for predicting and optimizing space utilization during the planning phase.

This study's approach to space management aligns with the existing body of research that highlights the importance of spatiotemporal planning in construction. Like the work of Akinci & Fischer (2000), which underscored the need for collecting and utilizing spatiotemporal data from subcontractors for more effective planning, DMORS integrates both spatial and temporal dimensions into the scheduling process. However, DMORS goes beyond the static or manual approaches discussed in earlier works by incorporating realtime adjustments to space occupancy rates, offering a more dynamic and flexible solution than prior models such as PECASO by (Mallasi, 2006), which focused primarily on minimizing conflicts through static workspace competition analysis.

A key contribution of DMORS is its emphasis on the occupancy rate (OR) as a critical metric for managing construction sites. This concept shares similarities with the occupancy-based frameworks proposed by Guo (2002) and Said & El-Rayes (2013), which also sought to resolve space conflicts. However, while those models relied heavily on deterministic and heuristic methods and precalculated values, DMORS introduces a dynamic calculation methodology that is adaptable to ongoing changes on the construction site. This flexibility addresses one of the major limitations found in previous models, which often struggled with the adaptability required in highly dynamic construction environments.

The integration of graphical elements into DMORS for visualizing space usage at different points in time is another area where this study diverges from previous work. The graphical modeling techniques employed in DMORS build upon concepts from Chronographic Modelling (Francis, 2013, 2004, 2019, 2020), but with additional features such as mini artefacts that allow for more precise visual tracking of space usage. Unlike the more rigid visualizations in 4D-BIM models discussed by Mirzaei *et al.* (2018), DMORS provides a more flexible and easily interpretable

visual representation of both space and time, thus making it more accessible for project managers to optimize their workflows.

Moreover, while previous models like the Location-Based Management System (LBMS) focused on ensuring continuous workflows through linear planning (Kenley & Seppänen, 2009; Kenley & Seppänen, 2010; Olivieri *et al.*, 2018), DMORS focus on building projects where linear planning is almost impossible to apply and adds an additional layer by considering space as a critical resource that must be dy-namically managed alongside time and labor. This offers a more comprehensive approach to project management, especially in environments with constrained resources or overlapping activities.

6.8 Conclusions

This paper demonstrates the development of a construction planning system that integrates Chronographic Modelling with the dynamic calculation of the occupancy rate (OR) on construction sites. By combining spatial visualization and dynamic planning, this system allows construction managers to better anticipate space utilization, minimize travel, and improve overall safety and efficiency.

So, this study has introduced the Dynamic Model of the Occupancy Rate Schedule (DMORS), which enables managers to visualize and dynamically adjust the occupation of space on a site. By calculating ORs for individual sectors and entire floors, the model allows for an optimized workflow that minimizes overcrowding and maximizes the effective use of available space. The validation of static artifacts and the DMORS through a case studies has provided a proof of concept, highlighting the model's potential to optimize construction planning.

The process begins by dividing the site into sectors to calculate available surface areas and the perimeter wall length for each sector. To determine the OR for an entire floor, the relative weight of each sector is calculated. Since some sectors are more critical than others during construction, adjusted weights are also applied.

Next, the total occupied area of a sector is calculated by summing the space used by all OTs within that sector. This spatial positioning allows for a static and dynamic representation of the OR for each sector, floor, and timeframe within the project's schedule (DMORS).

To provide a dynamic visualization, mini artefacts have been designed to indicate the positioning of OTs in both space and time, along with their interrelationships. A procedure is presented that enables dynamic spatiotemporal representation and optimization of ORs. The proposed framework was tested using a fictitious project to demonstrate the effectiveness of this visualization and optimization process.

Despite the promising results, several constraints and limitations must be addressed in future research. The proposed system requires constant data collection and processing, which necessitates the development of specific software applications. Furthermore, the need for continuous updates and tracking of changes during construction is critical to ensuring the model's accuracy in real-time scenarios. Future validations on real construction projects will be essential to fully assess the practicality and efficiency of the DMORS system in optimizing space usage on active job sites.

CHAPITRE 7

DISCUSSION DES RÉSULTATS

Dans une industrie où les échéanciers sont une partie importante, voire essentielle, au succès du projet, les techniques de planification actuelles ont plusieurs limitations, principalement au niveau de la représentation et de la modélisation d'informations pouvant être importantes à l'optimisation des travaux. Ainsi, ce projet de recherche avait donc comme objectif de proposer une méthodologie de planification des travaux permettant aux gestionnaires de projets de modéliser dynamiquement le taux d'occupation, afin qu'ils puissent l'optimiser lors de la phase de planification des travaux.

L'instauration de nouveaux processus de gestion et de nouvelle technologie s'est toujours avérée être un défi dans l'industrie de la construction et l'implantation du *Space Planning* n'y échappe pas. Ainsi, l'ajout de la modélisation dynamique du taux d'occupation pourrait servir d'incitatif supplémentaire pour encourager une utilisation plus régulière du *Space Planning* en proposant une solution concrète pour la gestion de l'espace disponible et des déplacements sur le chantier.

La collecte de données initiales qui a servi de base pour ce projet de recherche a fait ressortir un défi lié à la quantité de données qui devaient être collectées. Car au moment de faire les relevés, chaque technologie étudiée avait des limitations pouvant impacter soit la qualité, la quantité ou le temps requis pour obtenir l'information. Lors de l'application du PMDTO sur un chantier, les gestionnaires de projets devront donc tenir compte de ces limitations, en plus des autres besoins qu'ils ont en matière de gestion de l'information. Cependant, l'utilisation des capacités du BIM à améliorer la gestion de l'information du chantier pourrait aider à l'utilisation du PMDTO. Cela aiderait surtout à éviter d'ajouter une charge de travail supplémentaire aux gestionnaires qui, généralement, sont déjà très occupés. Il faudrait ainsi intégrer l'utilisation du PMDTO aux procédures de gestion actuellement utilisées dans l'industrie.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de cette recherche était de proposer une méthodologie permettant de faire une modélisation spatiotemporelle dynamique du taux d'occupation du chantier. Cette approche doit ainsi permettre aux gestionnaires de projets du domaine de la construction de l'utiliser pour optimiser les travaux. Cela a donc mené à la conception du PMDTO, une méthodologie de conception de l'échéancier qui utilise les capacités de la Modélisation Chronographique comme base pour planifier les travaux pour ensuite calculer, modéliser et afficher le taux d'occupation spatiotemporel dynamique.

La toute première étape était donc d'effectuer une collecte de données sur des chantiers. Cependant, les premières collectes ont démontré l'importance de la technologie utilisée sur la qualité des informations relevées.

Il a donc été décidé d'étudier plus en détail les technologies disponibles et de les comparer aux besoins pour ce projet de recherche et pour les gestionnaires de la construction. Cela a permis d'établir que la prise de photos sphériques et standards représentait les meilleures technologies à utiliser. Chaque semaine, les chantiers sélectionnés pour faire les relevés étaient photographiés dans leur totalité avec une caméra sphérique. Une caméra standard filmait également tout au long des relevés afin d'offrir une source d'information supplémentaire. Lors du traitement des données, chacune des photos et vidéos a été analysée et, avec l'aide de *BlueBeam Revu*, un logiciel spécialisé dans le traitement des fichiers PDF, une représentation schématique du positionnement de tous les éléments présents sur le chantier a été créée lorsque le relevé a été effectué.

Par la suite, une caractérisation de chacune de ces occupations a permis d'étudier plus en détail l'évolution de l'occupation des équipes de travail et des ressources sur le chantier au fur et à mesure de la progression des travaux, ainsi que de déterminer les principaux paramètres liés aux OT et aux secteurs, essentiels au calcul du taux d'occupation.

La conception de la méthodologie du PMDTO consistait à établir la procédure de calcul statique de l'OR. Pour ce faire, des artéfacts statiques sont proposés afin de représenter l'occupation des OT dans les secteurs, ce qui permet de calculer l'OR statique de chaque OT dans le secteur où il est positionné. Une fois le processus de calcul et d'optimisation de l'OR pour chaque secteur établi, la méthodologie de calcul de l'OR dynamique a été proposée. Celle-ci consistait à la conception de mini artéfacts pour effectuer la modélisation dynamique des OT avec la Modélisation chronographique. Cette modélisation dynamique des OT permettait ensuite de concevoir la méthodologie de calcul et d'optimisation des OR pour une partie du chantier et pour chacune des périodes de l'échéancier.

Il faut cependant souligner que le PMDTO est destiné aux projets de construction de bâtiments. Également, bien que l'ensemble des informations nécessaires aux calculs soient disponibles aux gestionnaires, le traitement de cette information représente un effort considérable qui va nécessiter le développement d'une application spécifique. Aucun processus n'a été établi permettant de faire le suivi d'un PMDTO pendant l'exécution des travaux, car une telle procédure demanderait de collecter le positionnement, et si possible l'occupation, des OT et de les comparer à la planification initiale.

Il sera cependant nécessaire d'élaborer des procédures spécifique pour son application, allant de l'établissement des besoins initiaux jusqu'à la réception définitive, incluant la gestion des réclamations. L'objectif sera de tester la faisabilité et l'efficacité du PMDTO dans des contextes réels, en intégrant le prototype d'application qui permettra de modéliser, suivre et ajuster dynamiquement le taux d'occupation des espaces en fonction des besoins évolutifs du projet. Ce prototype sera soumis à des essais sous conditions contrôlées afin d'évaluer sa performance et sa compatibilité avec les contraintes et exigences spécifiques de l'industrie de la construction. Les retours des tests permettront d'apporter les ajustements nécessaires pour garantir que l'outil

répondre pleinement aux attentes des professionnels, renforçant ainsi la fiabilité et l'adoption de la PMDTO dans des environnements pratiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdelrazig, Y. (2015). Dynamic Construction Site Layout Using Ant Colony Optimization. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 9(5), 621–625. Repéré à <https://publications.waset.org/10001462/dynamic-construction-site-layout-using-ant-colony-optimization>.
- Acosta, N. & Toloza, J. (2012). Techniques to improve the GPS precision. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 3(8). Publisher : Citeseer.
- Akinci, B. & Fischer, M. (2000). An Automated Approach for Accounting for Spaces Required by Construction Activities. 1–10. doi : 10.1061/40475(278)1. Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Akinci, B., Fischer, M. & Kunz, J. (2002a). Automated Generation of Work Spaces Required by Construction Activities. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(4), 306–315. doi : 10.1061/(asce)0733-9364(2002)128:4(306). ISBN : Working Paper #58.
- Akinci, B., Fischer, M., Levitt, R. & Carlson, R. (2002b). Formalization and Automation of Time-Space Conflict Analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(2), 124–134. doi : 10.1061/(ASCE)0887-3801(2002)16:2(124). Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Akinci, B., Boukamp, F., Gordon, C., Huber, D., Lyons, C. & Park, K. (2006). A formalism for utilization of sensor systems and integrated project models for active construction quality control. *Automation in Construction*, 15(2), 124–138. doi : 10.1016/j.autcon.2005.01.008.
- Anderson, D., Herman, H. & Kelly, A. (2005). Experimental characterization of commercial flash ladar devices. *International Conference of Sensing and Technology*, 2, 17–23.
- Ardila, F. & Francis, A. (2020). Spatiotemporal Planning of Construction Projects : A Literature Review and Assessment of the State of the Art. *Frontiers in Built Environment*, 6, 128. doi : 10.3389/FBUIL.2020.00128/BIBTEX. Publisher : Frontiers Media S.A.
- Ardila, F. A. & Francis, A. (2015a). Design and Validation of the First Phase of the New Chronographical Standard Protocol for Construction Project Scheduling. *5th International/11th Construction Specialty Conference*, 104, 1–9.
- Ardila, F. A. & Francis, A. (2015b). The chronographic protocol : validation of textures and colors. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 5(7), 8.
- Arif, O., Ray, S. J., Vela, P. A. & Teizer, J. (2014). Potential of Time-of-Flight Range Imaging for Object Identification and Manipulation in Construction. *Journal of Computing in Civil*

- Engineering*, 28(6), 06014005. doi : 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000304. Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Aryan, A., Bosché, F. & Tang, P. (2021). Planning for terrestrial laser scanning in construction : A review. *Automation in Construction*, 125, 103551. doi : 10.1016/j.autcon.2021.103551.
- Badiru, A. B. (1995). *Comprehensive Project Management : Integrating Optimization Models, Management Principles, and Computers*. Prentice Hall PTR. Repéré à <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=202049https://books.google.co.id/books/about/Comprehensive{ }Project{ }Management.html?id=CEG1AAAAIAAJ{ }&pgis=1>.
- Bakchan, A., Faust, K. M. & Leite, F. (2019). Seven-dimensional automated construction waste quantification and management framework : Integration with project and site planning. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 462–474. doi : 10.1016/j.resconrec.2019.02.020.
- Bansal, V. K. (2011). Use of GIS and Topology in the Identification and Resolution of Space Conflicts. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 25(2), 159–171. doi : 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000075.
- Bascoul, A. M., Tommelein, I. D. & Douthett, D. (2020). Visual Management of Daily Construction Site Space Use. *Frontiers in Built Environment*, 6. Repéré à <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fbuil.2020.00139>.
- Bonnal, P., Gourc, D., Hameri, A. & Lacoste, G. (2005). A linear-discrete scheduling model for the resource-constrained project scheduling problem. *Construction Management and Economics*, 23(8), 797–814. doi : 10.1080/01446190500040869. Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/01446190500040869>.
- Boton, C., St-Pierre, E. & Lefebvre, G. (2020). Should medium-sized contractors still implement home-made information technologies on construction sites? *Frontiers of Engineering Management*, 7(1), 142–158. doi : 10.1007/s42524-019-0065-9.
- Brilakis, I., Park, M. W. & Jog, G. (2011). Automated vision tracking of project related entities. *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), 713–724. doi : 10.1016/j.aei.2011.01.003. Publisher : Elsevier Ltd ISBN : 1474-0346.
- Cai, Y., Ou, Y. & Qin, T. (2024). Improving SLAM Techniques with Integrated Multi-Sensor Fusion for 3D Reconstruction. *Sensors*, 24(7), 2033. doi : 10.3390/s24072033. Number : 7 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Chau, K. W. (2004). A two-stage dynamic model on allocation of construction facilities with genetic algorithm. *Automation in Construction*, 13(4), 481–490. doi : 10.1016/j.autcon.2004.02.001.

- Chau, K. W., Anson, M. & Zhang, J. P. (2005). 4D dynamic construction management and visualization software : 1. Development. *Automation in Construction*, 14(4), 512–524. doi : 10.1016/j.autcon.2004.11.002.
- Chavada, R. D., Kassem, M., Dawood, N. N. & Naji, K. K. (2012). A Framework for Construction Workspace Management : A Serious Game Engine Approach. 57–64. doi : 10.1061/9780784412343.0008. ISBN : 9780784412343 Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Chen, S.-M., Griffis, F. H. B., Chen, P.-H. & Chang, L.-M. (2012). Simulation and analytical techniques for construction resource planning and scheduling. *Automation in Construction*, 21, 99–113. doi : 10.1016/j.autcon.2011.05.018.
- Cheng, M.-Y. & Yang, S.-C. (2001). GIS-Based Cost Estimates Integrating with Material Layout Planning. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(4), 291–299. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(2001)127:4(291). Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Cho, Y. K., Youn, J. H. & Martinez, D. (2010). Error modeling for an untethered ultra-wideband system for construction indoor asset tracking. *Automation in Construction*, 19(1), 43–54. doi : 10.1016/j.autcon.2009.08.001.
- Chua, D. K. H., Yeoh, K. W. & Song, Y. (2010). Quantification of Spatial Temporal Congestion in Four-Dimensional Computer-Aided Design. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(6), 641–649. doi : 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000166.
- Crowther, J. & Ajayi, S. O. (2019). Impacts of 4D BIM on construction project performance. *International Journal of Construction Management*, 21(7), 724–737. doi : 10.1080/15623599.2019.1580832. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1580832>.
- Dagan, D. & Isaac, S. (2015). Planning safe distances between workers on construction sites. *Automation in Construction*, 50, 64–71. doi : 10.1016/j.autcon.2014.12.008.
- Dave, B., Seppänen, O. & Modrich, R. U. (2016). Modeling Information Flows Between Last Planner and Location Based Management System. *Proceedings of the 24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Repéré à www.tcpdf.org.
- Dinis, F. M., Sanhudo, L., Martins, J. P. & Ramos, N. M. M. (2020). Improving project communication in the architecture, engineering and construction industry : Coupling virtual reality and laser scanning. *Journal of Building Engineering*, 30, 101287. doi : 10.1016/j.job.2020.101287.

- Dong, N., Ge, D., Fischer, M. & Haddad, Z. (2012). A genetic algorithm-based method for look-ahead scheduling in the finishing phase of construction projects. *Advanced Engineering Informatics*, 26(4), 737–748. doi : 10.1016/j.aei.2012.03.004.
- Easa, S. M. & Hossain, K. M. A. (2008). New Mathematical Optimization Model for Construction Site Layout. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(8), 653–662. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:8(653). Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Ebrahimi, Y., AbouRizk, S. M., Fernando, S. & Mohamed, Y. (2011). Simulation modeling and sensitivity analysis of a tunneling construction project's supply chain. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 18(5), 462–480. doi : 10.1108/09699981011074600. Publisher : Emerald Group Publishing Limited.
- El-Omari, S. & Moselhi, O. (2009). Data acquisition from construction sites for tracking purposes. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 16(5), 490–503. doi : 10.1108/09699980910988384. ISBN : 09699988 (ISSN).
- El-Omari, S. & Moselhi, O. (2011). Integrating automated data acquisition technologies for progress reporting of construction projects. *Automation in Construction*, 20(6), 699–705. doi : 10.1016/j.autcon.2010.12.001.
- El-Rayes, K. (2001). Object-Oriented Model for Repetitive Construction Scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(3), 199–205. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(2001)127:3(199).
- El-Rayes, K. & Moselhi, O. (1998). Resource-driven scheduling of repetitive activities. *Construction Management and Economics*, 16(4), 433–446. doi : 10.1080/014461998372213. Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/014461998372213>.
- El-Rayes, K. & Said, H. (2009). Dynamic Site Layout Planning Using Approximate Dynamic Programming. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 23(2), 119–127. doi : 10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:2(119). Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Farmakis, P. M. & Chassiakos, A. P. (2017). Dynamic Multi-objective Layout Planning of Construction Sites. *Procedia Engineering*, 196, 674–681. doi : 10.1016/j.proeng.2017.08.057.
- Fathi, H., Dai, F. & Lourakis, M. (2015). Automated as-built 3D reconstruction of civil infrastructure using computer vision : Achievements, opportunities, and challenges. *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), 149–161. doi : 10.1016/j.aei.2015.01.012.

- Forcael, E., Ferrari, I., Opazo-Vega, A. & Pulido-Arcas, J. A. (2020). Construction 4.0 : A Literature Review. *Sustainability*, 12(22), 9755. doi : 10.3390/su12229755. Number : 22
Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Forgues, D. & Becerik-Gerber, B. (2013). Integrated project delivery and building information modeling : Redefining the relationship between education and practice. *International Journal of Design Education*, 6(2), 47–56.
- Francis, A. (2004). *La modélisation chronographique de la planification des projets de construction*. (Thèse de doctorat, Montréal). Repéré à <http://espace.etsmtl.ca/692/>.
- Francis, A. (2013). The chronographical approach for construction project modelling. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Management, Procurement and Law*, 166(4), 188–204. doi : 10.1680/mpal.12.00009.
- Francis, A. (2015). Applying the chronographical approach for modelling to different types of projects. *Proceedings of the 5th International/11th Construction Specialty Conference*, 101(2010), 1–9.
- Francis, A. (2016). A chronographic protocol for modelling construction projects. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Management, Procurement and Law*, 169(4), 168–177. doi : 10.1680/jmapl.15.00039.
- Francis, A. (2017a). Simulating Uncertainties in Construction Projects with Chronographical Scheduling Logic. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(1), 1–14. doi : 10.1061/(ASCE)CO.
- Francis, A. (2017b). Chronographic Allocation Techniques for Construction Projects. *Journal of Civil Engineering and Science*, 6(1), 24–36. doi : 10.5963/JCES0601003.
- Francis, A. (2019). Chronographical spatiotemporal scheduling optimization for building projects. *Frontiers in Built Environment*, 5(4), 1–14. doi : 10.3389/fbuil.2019.00036.
- Francis, A. (2020). Chronographical Site-Spatial-Temporal Modeling of Construction Operations. *Frontiers in Built Environment*, 6, 67. doi : 10.3389/fbuil.2020.00067. Publisher : Frontiers.
- Francis, A. (2023). Automate and standardize multi-story building schedules through repetitive spatiotemporal model. pp. 426–431. doi : 10.3311/CCC2023-056.
- Francis, A. & Miresco, E. (2006). Toward a New Generation of Construction Management Software. *Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering June 14-16, 2006 - Montréal, Canada TOWARD*, 1(3), 3559–3567.

- Francis, A. & Miresco, E. (2013). Applying the Chronographical Approach to the modelling of multi-storey building projects. *Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*, 2(January), 1–8.
- Francis, A. & Miresco, E. (2016). Schedule margins computation using the Chronographic Logic. *16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, pp. 1941–1948.
- Francis, A. & Miresco, E. T. (2002). Decision Support for Project Management using A Chronographic Approach. *Journal of Decision Systems*, 11(3-4), 383–404. doi : 10.3166/jds.11.383-404.
- Francis, A. & Morin-Pepin, S. (2017, jan). The Concept of Float Calculation Based on the Site Occupation using the Chronographical Logic. *Procedia Engineering*, 196(2017), 690–697. doi : 10.1016/j.proeng.2017.07.235.
- Francis, A., Miresco, E. & Meur, E. L. (2019). Spatiotemporal chronographical modeling of procurement and material flow for building projects. *Advances in Computational Design*, 4(2), 119–139. doi : 10.12989/acd.2019.4.2.119.
- Frandsen, A. & Tommelein, I. D. (2014). Development of a takt-time plan : A case study. *Construction Research Congress 2014 : Construction in a Global Network - Proceedings of the 2014 Construction Research Congress*, 1646–1655. doi : 10.1061/9780784413517.0168.
- Frandsen, A., Berghede, K. & Tommelein, I. D. (2014). Takt-Time Planning and the Last Planner. *Iglc-22*, 1(510), 571–580.
- Franguez, V., Salido-Monzú, D. & Wieser, A. (2022). Assessment and Improvement of Distance Measurement Accuracy for Time-of-Flight Cameras. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1–11. doi : 10.1109/TIM.2022.3167792. Conference Name : IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.
- Fulford, R. & Standing, C. (2014). Construction industry productivity and the potential for collaborative practice. *International Journal of Project Management*, 32(2), 315–326. doi : 10.1016/j.ijproman.2013.05.007. ISBN : 1880410621.
- Fung, W. H., I., Wong, C. K., Tam, C. M. & Tong, T. K. (2008). Optimizing Material Hoisting Operations and Storage Cells in Single Multi-storey Tower Block Construction by Genetic Algorithm. *International Journal of Construction Management*, 8(2), 53–64. doi : 10.1080/15623599.2008.10773115. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/15623599.2008.10773115>.

- Gharaie, E., Afshar, A. & Jalali, M. R. (2006). Site layout optimization with ACO algorithm. pp. 90–94.
- Golpîra, H. (2020). Optimal integration of the facility location problem into the multi-project multi-supplier multi-resource Construction Supply Chain network design under the vendor managed inventory strategy. *Expert Systems with Applications*, 139, 112841. doi : 10.1016/j.eswa.2019.112841.
- Gong, J., Caldas, C. H. & Gordon, C. (2011). Learning and classifying actions of construction workers and equipment using Bag-of-Video-Feature-Words and Bayesian network models. *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), 771–782. doi : 10.1016/j.aei.2011.06.002. Publisher : Elsevier Ltd ISBN : 1474-0346.
- Guo, S.-J. (2002). Identification and Resolution of Work Space Conflicts in Building Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(4), 287–295. doi : 10.1061/ASCE10733-9364128:4287.
- Hajdu, M., Skibniewski, M. J., Vanhoucke, M., Horvath, A. & Brilakis, I. (2016). How Many Types of Critical Activities Exist? A Conjecture in Need of Proof. *Procedia Engineering*, 164, 3–11. doi : 10.1016/j.proeng.2016.11.585.
- Hamledari, H., McCabe, B. & Davari, S. (2017). Automated computer vision-based detection of components of under-construction indoor partitions. *Automation in Construction*, 74, 78–94. doi : 10.1016/j.autcon.2016.11.009. Publisher : Elsevier B.V. ISBN : 09265805.
- Hasan, A., Baroudi, B., Elmualim, A. & Rameezdeen, R. (2018). Factors affecting construction productivity : a 30 year systematic review. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 25(7), 916–937. doi : 10.1108/ECAM-02-2017-0035. Publisher : Emerald Publishing Limited.
- Hawarneh, A. A., Bendak, S. & Ghanim, F. (2021). Construction site layout planning problem : Past, present and future. *Expert Systems with Applications*, 168, 114247. doi : 10.1016/j.eswa.2020.114247.
- He, Y. & Chen, S. (2019). Recent Advances in 3D Data Acquisition and Processing by Time-of-Flight Camera. *IEEE Access*, 7, 12495–12510. doi : 10.1109/ACCESS.2019.2891693. Conference Name : IEEE Access.
- Herrera-Granda, E. P., Torres-Cantero, J. C., Rosales, A. & Peluffo-Ordóñez, D. H. (2023). A Comparison of Monocular Visual SLAM and Visual Odometry Methods Applied to 3D Reconstruction. *Applied Sciences*, 13(15), 8837. doi : 10.3390/app13158837. Number : 15 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J. & Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Quarterly : Management Information Systems*, 28(1), 75–105. doi : 10.2307/25148625.
- Hinze, J. (2004). *Construction planning and scheduling*. Pearson/Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- Hosamo, H. H. & Hosamo, M. H. (2022). Digital Twin Technology for Bridge Maintenance using 3D Laser Scanning : A Review. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1), 2194949. doi : 10.1155/2022/2194949. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2022/2194949>.
- Hossan, M. & Nadeem, A. (2019, may). TOWARDS DIGITIZING THE CONSTRUCTION INDUSTRY : STATE OF THE ART OF CONSTRUCTION 4.0. 6. doi : 10.14455/I-SEC.res.2019.184.
- Hou, J., Yu, L. & Fei, S. (2022). A high-quality voxel 3D reconstruction system for large scenes based on the branch and bound method. *Expert Systems with Applications*, 194, 116549. doi : 10.1016/j.eswa.2022.116549.
- Huang, C., Wong, C. K. & Tam, C. M. (2010). Optimization of material hoisting operations and storage locations in multi-storey building construction by mixed-integer programming. *Automation in Construction*, 19(5), 656–663. doi : 10.1016/j.autcon.2010.02.005.
- Huang, C. & Wong, C. K. (2019). Optimization of Vertical Elevator Movements and Material Storage Locations for High-Rise Building Construction with Overtime Cost Effects. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 33(1), 04018054. doi : 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000794. Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Ibrahim, Y. M., Lukins, T. C., Zhang, X., Trucco, E. & Kaka, A. P. (2009). Towards automated progress assessment of workpackage components in construction projects using computer vision. *Advanced Engineering Informatics*, 23(1), 93–103. doi : 10.1016/j.aei.2008.07.002. Publisher : Elsevier Ltd ISBN : 1474-0346.
- Igwe, C., Nasiri, F. & Hammad, A. (2020). Construction workspace management : critical review and roadmap. *International Journal of Construction Management*, 0(0), 1–14. doi : 10.1080/15623599.2020.1756028. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1756028>.
- Isaac, S., Su, Y., Lucko, G. & Dagan, D. (2017). Work-Path Modeling and Spatial Scheduling with Singularity Functions. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(4), 04017008. doi : 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000650. Publisher : American Society of Civil Engineers.

- Jang, H., Kim, S. & Russell, J. S. (2003, mar). Manage Space for Construction Facilities on High-Rise Buildings. *Construction Research Congress*, pp. 1–8. doi : 10.1061/40671(2003)108.
- Jang, H., Lee, S. & Choi, S. (2007). Optimization of floor-level construction material layout using Genetic Algorithms. *Automation in Construction*, 16(4), 531–545. doi : 10.1016/j.autcon.2006.09.006.
- Jongeling, R. & Olofsson, T. (2007). A method for planning of work-flow by combined use of location-based scheduling and 4D CAD. *Automation in Construction*, 16(2), 189–198. doi : 10.1016/j.autcon.2006.04.001.
- Jongeling, R., Kim, J., Fischer, M., Mourgues, C. & Olofsson, T. (2008). Quantitative analysis of workflow, temporary structure usage, and productivity using 4D models. *Automation in Construction*, 17(6), 780–791. doi : 10.1016/j.autcon.2008.02.006.
- Kassem, M., Dawood, N. & Chavada, R. (2015). Construction workspace management within an Industry Foundation Class-Compliant 4D tool. *Automation in Construction*, 52, 42–58. doi : 10.1016/j.autcon.2015.02.008.
- Kaveh, A., Khanzadi, M., Alipour, M. & Moghaddam, M. R. (2016). Construction Site Layout Planning Problem Using Two New Meta-heuristic Algorithms. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 40(4), 263–275. doi : 10.1007/s40996-016-0041-0.
- Kenley, R. & Seppänen, O. (2010). *Location-based management for construction : Planning, scheduling and control*. Spon Press. Repéré à <https://ebookcentral.proquest.com/lib/etsmtl-ebooks/bookshelf.action?folderOption=BOOKSHELF{ }FOLDER{& }folderId=1341658>.
- Kenley, R. & Seppänen, O. (2009). Location-based management of construction projects : Part of a new typology for project scheduling methodologies. *Proceedings - Winter Simulation Conference*, pp. 2563–2570. doi : 10.1109/WSC.2009.5429669.
- Khoury, H. M. & Kamat, V. R. (2009). Evaluation of position tracking technologies for user localization in indoor construction environments. *Automation in Construction*, 18(4), 444–457. doi : 10.1016/j.autcon.2008.10.011.
- Kim, C., Kim, C. & Son, H. (2013). Fully automated registration of 3D data to a 3D CAD model for project progress monitoring. *Automation in Construction*, 35, 587–594. doi : 10.1016/j.autcon.2013.01.005. Publisher : Elsevier B.V.
- Kim, K. J. & Kim, K. (2010). Case Study on the Evaluation of Equipment Flow at a Construction Site. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(6), 570–575. doi : 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000051. Publisher : American Society of Civil Engi-

neers.

- Kim, K. & de la Garza, J. M. (2005). Critical Path Method with Multiple Calendars. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(3), 330–342. doi : 10.1061/(asce)0733-9364(2005)131:3(330).
- Kim, K. & Cho, Y. K. (2015). Construction-specific spatial information reasoning in Building Information Models. *Advanced Engineering Informatics*, 29(4), 1013–1027. doi : 10.1016/j.aei.2015.08.004.
- Ko, C.-H. (2013). 3D-Web-GIS RFID Location Sensing System for Construction Objects. *The Scientific World Journal*, 2013(1), 217972. doi : 10.1155/2013/217972. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2013/217972>.
- Kozlovska, M., Klosova, D. & Strukova, Z. (2021). Impact of Industry 4.0 Platform on the Formation of Construction 4.0 Concept : A Literature Review. *Sustainability*, 13(5), 2683. doi : 10.3390/su13052683. Number : 5 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Kumar, S. S. & Cheng, J. C. (2015). A BIM-based automated site layout planning framework for congested construction sites. *Automation in Construction*, 59, 24–37. doi : 10.1016/j.autcon.2015.07.008.
- Kähler, O., Prisacariu, V. A. & Murray, D. W. (2016). Real-Time Large-Scale Dense 3D Reconstruction with Loop Closure. *Computer Vision – ECCV 2016*, pp. 500–516. doi : 10.1007/978-3-319-46484-8_30.
- Lam, K.-C., Ning, X. & Lam, M. C.-K. (2009). Conjoining MMAS to GA to Solve Construction Site Layout Planning Problem. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(10), 1049–1057. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(2009)135:10(1049). Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Li, H. & Love, P. E. D. (1998). Site-Level Facilities Layout Using Genetic Algorithms. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 12(4), 227–231. doi : 10.1061/(ASCE)0887-3801(1998)12:4(227). Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Li, H., Chan, G., Skitmore, M. & Huang, T. (2015). A 4D automatic simulation tool for construction resource planning : a case study. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 22(5), 536–550. doi : 10.1108/ECAM-07-2014-0093. Publisher : Emerald Group Publishing Limited.
- Li, K., Luo, H. & Skibniewski, M. J. (2019). A non-centralized adaptive method for dynamic planning of construction components storage areas. *Advanced Engineering Informatics*, 39,

- 80–94. doi : 10.1016/j.aei.2018.12.001.
- Lien, L.-C. & Cheng, M.-Y. (2012). A hybrid swarm intelligence based particle-bee algorithm for construction site layout optimization. *Expert Systems with Applications*, 39(10), 9642–9650. doi : 10.1016/j.eswa.2012.02.134.
- Linnik, M., Berghede, K. & Ballard, G. (2013). An experiment in takt time planning applied to non-repetitive work. *21st Annual Conference of the International Group for Lean Construction 2013*, 546–555. Repéré à <https://www.engineeringvillage.com/share/document.url?mid=cpx{ }772ff42f147219c4589M39c810178163125{&}database=cpx>.
- Lucko, G., Said, H. M. M. & Bouferguene, A. (2014). Construction spatial modeling and scheduling with three-dimensional singularity functions. *Automation in Construction*, 43, 132–143. doi : 10.1016/j.autcon.2014.03.008.
- Luo, X., Li, H., Wang, H., Wu, Z., Dai, F. & Cao, D. (2019). Vision-based detection and visualization of dynamic workspaces. *Automation in Construction*, 104, 1–13. doi : 10.1016/j.autcon.2019.04.001.
- Mallasi, Z. (2006). Dynamic quantification and analysis of the construction workspace congestion utilising 4D visualisation. *Automation in Construction*, 15(5), 640–655. doi : 10.1016/j.autcon.2005.08.005.
- Mallasi, Z. (2009). Towards minimizing space-time conflicts between site activities using simple generic algorithm - the best execution strategy. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 14(14), 154–179. Repéré à <http://itcon.org/paper/2009/14>.
- Maneesilp, J., Wang, C., Wu, H. & Tzeng, N.-F. (2013). RFID Support for Accurate 3D Localization. *IEEE Transactions on Computers*, 62(7), 1447–1459. doi : 10.1109/TC.2012.83. Conference Name : IEEE Transactions on Computers.
- Martins, S. S., Evangelista, A. C. J., Hammad, A. W. A., Tam, V. W. Y. & Haddad, A. (2020). Evaluation of 4D BIM tools applicability in construction planning efficiency. *International Journal of Construction Management*, 0(0), 1–14. doi : 10.1080/15623599.2020.1837718. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1837718>.
- Mawdesley, M. J., Al-jibouri, S. H. & Yang, H. (2002). Genetic Algorithms for Construction Site Layout in Project Planning. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(5), 418–426. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:5(418).
- Mazars, T. & Francis, A. (2020). Chronographical spatiotemporal dynamic 4D planning. *Automation in Construction*, 112, 103076. doi : 10.1016/j.autcon.2020.103076. Publisher : Elsevier B.V.

- Mirzaei, A., Nasirzadeh, F., Parchami Jalal, M. & Zamani, Y. (2018). 4D-BIM Dynamic Time–Space Conflict Detection and Quantification System for Building Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(7), 04018056. doi : 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001504. Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Misron, N. F., Khoiry, M. A. & Hamzah, N. (2018). A Framework of Efficient Material Storage Management on Congested Construction Site. *E3S Web of Conferences*, 65, 03005. doi : 10.1051/e3sconf/20186503005.
- Moon, H., Kim, H., Kim, C. & Kang, L. (2014). Development of a schedule-workspace interference management system simultaneously considering the overlap level of parallel schedules and workspaces. *Automation in Construction*, 39, 93–105. doi : 10.1016/j.autcon.2013.06.001.
- Morin Pepin, S. & Francis, A. (2018). Calculation of the construction sites' occupancy rate using chonographic modeling. *CSCE General Conference 2018, Held as Part of the Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference 2018*, pp. 653–659.
- Morin Pépin, S. & Francis, A. (2019). Technologies currently available to obtain the occupancy rate of ressources on a construction sites. *7th CSCE Annual Conference*, pp. 9.
- Morin Pépin, S. & Francis, A. (2024). Modeling and categorizing standardized artifacts for scheduling occupancy on building construction sites. *Frontiers in Built Environment*, 10. doi : 10.3389/fbuil.2024.1380106. Publisher : Frontiers.
- Moselhi, O. & El-Rayes, K. (1993). Scheduling of Repetitive Projects with Cost Optimization. *Journal of Construction Engineering and Management*, 119(4), 681–697. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(1993)119:4(681). Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Moselhi, O., Leonard, C. & Fazio, P. (1991). Impact of change orders on construction productivity. *Canadian journal of civil engineering*, 18(3), 484–492. doi : 10.1139/l91-059. ISBN : 0315-1468.
- Moselhi, O., Assem, I. & El-Rayes, K. (2005). Change Orders Impact on Labor Productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(3), 354–359. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:3(354). Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Moselhi, O., Bardareh, H. & Zhu, Z. (2020). Automated Data Acquisition in Construction with Remote Sensing Technologies. *Applied Sciences*, 10(8), 2846. doi : 10.3390/app10082846. Number : 8 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

- Mure-Dubois, J. & Hügli, H. (2008). Fusion of Time of Flight Camera Point Clouds. Repéré à <https://inria.hal.science/inria-00326781>.
- Mêda, P., Calvetti, D. & Sousa, H. (2023). Exploring the Potential of iPad-LiDAR Technology for Building Renovation Diagnosis : A Case Study. *Buildings*, 13(2), 456. doi : 10.3390/buildings13020456. Number : 2 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Neale, R. H. & Neale, D. E. (1989). *Construction planning*. Thomas Telford.
- Nguyen, T. A., Do, S. T., Pham, T.-A. & Nguyen, M. C. (2021). Application of BIM and 3D laser scanning for quantity surveying and quality management in construction projects. *AIP Conference Proceedings*, 2428(1), 030003. doi : 10.1063/5.0070845.
- Ning, X., Lam, K. C. & Lam, M. C. K. (2010). Dynamic construction site layout planning using max-min ant system. *Automation in Construction*, 19(1), 55–65. doi : 10.1016/j.autcon.2009.09.002. Publisher : Elsevier B.V. ISBN : 0926-5805.
- Olivieri, H., Seppänen, O. & Denis Granja, A. (2018). Improving workflow and resource usage in construction schedules through location-based management system (LBMS). *Construction Management and Economics*, 36(2), 109–124. doi : 10.1080/01446193.2017.1410561.
- Omar, T. & Nehdi, M. L. (2016). Data acquisition technologies for construction progress tracking. *Automation in Construction*, 70, 143–155. doi : 10.1016/j.autcon.2016.06.016.
- Osman, H. M. & Georgy, M. E. (2012). Layout Planning of Construction Sites Considering Multiple Objectives : A Goalprogramming Approach. 1–10. doi : 10.1061/40754(183)130. Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Osman, H. M., Georgy, M. E. & Ibrahim, M. E. (2003). A hybrid CAD-based construction site layout planning system using genetic algorithms. *Automation in Construction*, 12(6), 749–764. doi : 10.1016/S0926-5805(03)00058-X.
- Park, M. W. & Brilakis, I. (2012). Construction worker detection in video frames for initializing vision trackers. *Automation in Construction*, 28, 15–25. doi : 10.1016/j.autcon.2012.06.001. Publisher : Elsevier B.V. ISBN : 09265805.
- Philip, M., Mahadevan, N. & Varghese, K. (1997). Optimization of construction site layout-A genetic algorithm approach. pp. 710–717.
- Pica, D. & Abanda, F. H. (2021). Emerging BIM-3D-Laser Scanning Integration in Construction Practice. *Collaboration and Integration in Construction, Engineering, Management and Technology*, pp. 345–350. doi : 10.1007/978-3-030-48465-1_58.

- Rankohi, S., Bourgault, M., Iordanova, I., Danjou, C., Garcia, P. & Grondin, J. (2023). Integration and I4.0 Tracking Systems for Steel Manufacturing Industry. *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2021*, pp. 237–247. doi : 10.1007/978-981-19-0968-9_19.
- Rao, S. S. (2019). *Engineering Optimization : Theory and Practice*. John Wiley & Sons.
- Raza, R. H. (2013). *Three dimensional localization and tracking for site safety using fusion of computer vision and rfid*. (phd, Michigan State University, USA). Repéré à AAI3604728 ISBN-13 : 9781303605819.
- Riley, D. R. & Sanvido, V. E. (1995). PATTERNS OF CONSTRUCTION-SPACE USE IN MULTISTORY BUILDINGS. *Journal of Construction Engineering and Management*, 121(DECEMBER), 464–473.
- Riley, D. R. & Sanvido, V. E. (1997). Space planning method for multistory building construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 123(2), 171–180. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(1997)123:2(171).
- Rosenfeld, Y. (2014). Root-Cause Analysis of Construction-Cost Overruns. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(1), 04013039. doi : 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000789. Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Said, H. & El-Rayes, K. (2013). Optimal utilization of interior building spaces for material procurement and storage in congested construction sites. *Automation in Construction*, 31, 292–306. doi : 10.1016/j.autcon.2012.12.010.
- Said, H. & Lucko, G. (2016). Float Types in Construction Spatial Scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(12), 04016077. doi : 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001202. Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Samdani, S. A., Bhakal, L. & Singh, A. K. (2006). Site layout of temporary construction facilities using ant colony optimization. *ASCE Los Angeles Section International Committee 4th International Engineering and Construction Conference at California State University, Fullerton on July*, 28.
- Sanad, H. M., Ammar, M. A. & Ibrahim, M. E. (2008). Optimal Construction Site Layout Considering Safety and Environmental Aspects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(7), 536–544. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:7(536). Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Sanders, S. R., Thomas, H. R., Smith, G. R. & Mannering, F. L. (1989). *An analysis of factors affecting labor productivity in masonry construction*. Pennsylvania Transportation Institute,

Pennsylvania State University.

- Sanni-Anibire, M. O., Mohamad Zin, R. & Olatunji, S. O. (2022). Causes of delay in the global construction industry : a meta analytical review. *International Journal of Construction Management*, 22(8), 1395–1407. doi : 10.1080/15623599.2020.1716132. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1716132>.
- Schöps, T., Sattler, T., Häne, C. & Pollefeys, M. (2015, oct). 3D Modeling on the Go : Interactive 3D Reconstruction of Large-Scale Scenes on Mobile Devices. *2015 International Conference on 3D Vision*, pp. 291–299. doi : 10.1109/3DV.2015.40.
- Schöps, T., Sattler, T., Häne, C. & Pollefeys, M. (2017). Large-scale outdoor 3D reconstruction on a mobile device. *Computer Vision and Image Understanding*, 157, 151–166. doi : 10.1016/j.cviu.2016.09.007.
- Seppänen, O., Evinger, J. & Mouflard, C. (2014). Effects of the location-based management system on production rates and productivity. *Construction Management and Economics*, 32(6), 608–624. doi : 10.1080/01446193.2013.853881.
- Shahi, A., Aryan, A., West, J. S., Haas, C. T. & Haas, R. C. G. (2012). Deterioration of UWB positioning during construction. *Automation in Construction*, 24, 72–80. doi : 10.1016/j.autcon.2012.02.009.
- Sloot, R. N. F., Heutink, A. & Voordijk, J. T. (2019). Assessing usefulness of 4D BIM tools in risk mitigation strategies. *Automation in Construction*, 106, 102881. doi : 10.1016/j.autcon.2019.102881.
- Stereva, K., Postolovski, A. & Gospodinov, S. (2020). Control in the Process of the Building Construction by Means of Stationary Terrestrial Laser Scanning. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 609(1), 012042. doi : 10.1088/1755-1315/609/1/012042. Publisher : IOP Publishing.
- Su, X. & Cai, H. (2016). Enabling Construction 4D Topological Analysis for Effective Construction Planning. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(1), 04014123. doi : 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000463. Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Su, X., Andoh, A. r., Cai, H., Pan, J., Kandil, A. & Said, H. M. (2012). GIS-based dynamic construction site material layout evaluation for building renovation projects. *Automation in Construction*, 27, 40–49. doi : 10.1016/j.autcon.2012.04.007.
- Tam, C. M., Tong, T. K. L. & Chan, W. K. W. (2001). Genetic Algorithm for Optimizing Supply Locations around Tower Crane. *Journal of Construction Engineering and Management*,

127(4), 315–321. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(2001)127:4(315). Publisher : American Society of Civil Engineers.

Tao, S., Wu, C., Sheng, Z. & Wang, X. (2018). Space-Time Repetitive Project Scheduling Considering Location and Congestion. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 32(3), 04018017. doi : 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000745. Publisher : American Society of Civil Engineers.

Thabet, W. Y. (1992). *A space-constrained resource-constrained scheduling system for multi-story buildings*. (Thèse de doctorat).

Thabet, W. Y. & Beliveau, Y. J. (1994). MODELING WORK SPACE TO SCHEDULE REPETITIVE FLOORS IN MULTISTORY BUILDINGS. *American Society of Civil Engineers*, 120(1), 20. Repéré à <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290733-9364%281994%29120%3A1%2896%29>.

Thomas, H. R. & Napolitan, C. L. (1995). Quantitative Effects of Construction Changes on Labor Productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, 121(3), 290–296. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(1995)121:3(290). ISBN : 0733-9364.

Thomas, H. R. & Yiakoumis, I. (1987). Factor Model of Construction Productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, 113(4), 623–639. doi : 10.1061/(asce)0733-9364(1987)113:4(623).

Thomas, H. R., Riley, D. R. & Messner, J. I. (2005). Fundamental Principles of Site Material Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(7), 808–815. doi : 10.1061/(asce)0733-9364(2005)131:7(808). ISBN : 07339364 (ISSN).

Tommelein, I. D., Levitt, R. E. & Hayes-Roth, B. (1992). Site-Layout Modeling : How Can Artificial Intelligence Help ? *Journal of Construction Engineering and Management*, 118(3), 594–611. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(1992)118:3(594). Publisher : American Society of Civil Engineers.

Tommelein, I. D. (1989). *SightPlan : An expert system that models and augments human decision-making for designing construction site layouts*. (Thèse de doctorat). Repéré à Publisher : Stanford University Place : Ann Arbor.

Tommelein, I. D. (2017). Collaborative Takt Time Planning of Non-Repetitive Work. *Proceeding of the 25th Annual Conference of the International group for Lean Construction*, (July), 745–752. Repéré à <https://iglcstorage.blob.core.windows.net/papers/iglc-2d3daed4-f094-4d84-a3f6-911960870186.pdf>.

- Tommelein, I. D., Levitt, R. E., Hayes-Roth, B. & Confrey, T. (1991). SightPlan experiments : alternate strategies for site layout design. *Computing in Civil Engineering*, 5(1), 42–63. doi : 10.1061/(ASCE)0887-3801(1991)5:1(42).
- Trimble, G. (1984). Resource-oriented scheduling. *International Journal of Project Management*, 2(2), 70–74. doi : 10.1016/S0263-7863(84)80002-2.
- Tucker, R. L. (1986). Management of Construction Productivity. *Journal of Management in Engineering*, 2(3), 148–156. doi : 10.1061/(asce)9742-597x(1986)2:3(148).
- Van Aken, J. E. (2005). Management Research as a Design Science : Articulating the Research Products of Mode 2 Knowledge Production in Management. *British Journal of Management*, 16(1), 19–36. doi : 10.1111/j.1467-8551.2005.00437.x. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1467-8551.2005.00437.x>.
- Varghese, K. & O'Connor, J. T. (1995). Routing Large Vehicles on Industrial Construction Sites. *Journal of Construction Engineering and Management*, 121(1), 1–12. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(1995)121:1(1). Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Wang, H. J., Zhang, J. P., Chau, K. W. & Anson, M. (2004). 4D dynamic management for construction planning and resource utilization. *Automation in Construction*, 13(5), 575–589. doi : 10.1016/j.autcon.2004.04.003.
- Weaver, P. (2012). Henry L Gantt , 1861 - 1919 A retrospective view of his work. *PM World Journal*, 2012(December), 1–17.
- Weerasinghe, I. P. & Ruwanpura, J. Y. (2009). Automated data acquisition system to assess construction worker performance. *Building a Sustainable Future - Proceedings of the 2009 Construction Research Congress*, pp. 61–70. doi : 10.1061/41020(339)7.
- Wetzel, E., Liu, J., Leathem, T. & Sattineni, A. (2022, jul). The Use of Boston Dynamics SPOT in Support of LiDAR Scanning on Active Construction Sites. doi : 10.22260/ISARC2022/0014.
- Whitman, J., Deshpande, A., Zech, W. & Perez, M. (2021). Construction Site Utilization Planning : A Process Based upon Industry Best Practices. *CivilEng*, 2(2), 309–324. doi : 10.3390/civileng2020017.
- Wiest, J. D. (1981). Precedence diagramming method : Some unusual characteristics and their implications for project managers. *Journal of Operations Management*, 1(3), 121–130. doi : 10.1016/0272-6963(81)90015-2.

- Winch, G. M. & North, S. (2006). Critical Space Analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(5), 473–481. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:5(473).
- Wu, K. & de Soto, B. G. (2021). Spatio-Temporal Planning Simulation of Temporary Elevators in Construction Using a Game Engine. 38, 295–302.
- Wu, K. & García de Soto, B. (2020). Spatiotemporal Modeling of Lifting Task Scheduling for Tower Cranes With a Tabu Search and 4-D Simulation. *Frontiers in Built Environment*, 6. Repéré à <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fbuil.2020.00079>.
- Xu, J. & Li, Z. (2012). Multi-Objective Dynamic Construction Site Layout Planning in Fuzzy Random Environment. *Automation in Construction*, 27, 155–169. doi : <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.017>.
- Xu, J., Zhao, S., Li, Z. & Zeng, Z. (2016). Bilevel Construction Site Layout Optimization Based on Hazardous-Material Transportation. *Journal of Infrastructure Systems*, 22(3), 04016014. doi : 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000303. Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Xu, M., Mei, Z., Luo, S. & Tan, Y. (2020). Optimization algorithms for construction site layout planning : a systematic literature review. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(8), 1913–1938. doi : 10.1108/ECAM-08-2019-0457. Publisher : Emerald Publishing Limited.
- Yahya, M. & Saka, M. P. (2014). Construction site layout planning using multi-objective artificial bee colony algorithm with Levy flights. *Automation in Construction*, 38, 14–29. doi : 10.1016/j.autcon.2013.11.001. Publisher : Elsevier B.V. ISBN : 0926-5805 ; 1872-7891.
- Yeh, I.-C. (1995). Construction-Site Layout Using Annealed Neural Network. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 9(3), 201–208. doi : 10.1061/(asce)0887-3801(1995)9:3(201).
- Zhang, H. & Wang, J. Y. (2008). Particle Swarm Optimization for Construction Site Unequal-Area Layout. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(9), 739–748. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:9(739). Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Zheng, T., Zhang, G., Han, L., Xu, L. & Fang, L. (2022). BuildingFusion : Semantic-Aware Structural Building-Scale 3D Reconstruction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44(5), 2328–2345. doi : 10.1109/TPAMI.2020.3042881. Conference Name : IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.
- Zhu, Z., German, S. & Brilakis, I. (2010). Detection of large-scale concrete columns for automated bridge inspection. *Automation in Construction*, 19(8), 1047–1055.

- doi : 10.1016/j.autcon.2010.07.016. Publisher : Elsevier B.V. ISBN : 0926-5805.
- Zolfagharian, S. & Irizarry, J. (2014). Current Trends in Construction Site Layout Planning. *Construction Research Congress 2014*, (2008), 1723–1732. doi : 10.1061/9780784413517.176. arXiv : 1011.1669v3 ISBN : 9788578110796.
- Zollhöfer, M., Siegl, C., Vetter, M., Dreyer, B., Stamminger, M., Aybek, S. & Bauer, F. (2015). Low-Cost Real-Time 3D Reconstruction of Large-Scale Excavation Sites. *J. Comput. Cult. Herit.*, 9(1), 2 :1–2 :20. doi : 10.1145/2770877.
- Zouein, P. P. & Tommelein, I. D. (1999). Dynamic Layout Planning Using a Hybrid Incremental Solution Method. *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(6), 400–408. doi : 10.1061/(asce)0733-9364(1999)125:6(400). ISBN : 6173734419.
- Zouein, P. P. & Tommelein, I. D. (2001). Improvement Algorithm for Limited Space Scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(2), 116–124. doi : 10.1061/(asce)0733-9364(2001)127:2(116).
- Zouein, P. P., Harmanani, H. & Hajar, A. (2002). Genetic Algorithm for Solving Site Layout Problem with Unequal-Size and Constrained Facilities. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(2), 143–151. doi : 10.1061/(asce)0887-3801(2002)16:2(143). ISBN : 0887-3801.
- Zouein, P. & Tommelein, I. (1994). Automating Dynamic Layout Construction. *Automation and Robotics in Construction Xi*, 409–416. doi : 10.1016/b978-0-444-82044-0.50058-8.