

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955-Skikda
Faculté des Technologie
Département de Génie civil
Laboratoire LMGHU
Référence: D012124009D



جامعة سكيكدة 20 أوت 1955
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية
مخبر المواد، الجيوتقني، السكن و العمران
المرجع: D012124009D

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme
de Doctorat en Sciences
En Génie Civil
Option : Techniques de réhabilitation du vieux bâti

Présentée par : **BOULKENAFET Nabil**

Thème

Optimisation de la productivité du travail dans la réhabilitation des bâtiments par la liaison au BIM

Sous la direction du **Pr BOUABAZ Mohamed**

Soutenue le : 30/05/2024

Devant le jury composé de :

Mme: Mouats Souhila	MCA	Université de Skikda	Présidente
Mr: BOUABAZ Mohamed	Pr	Université de Skikda	Rapporteur
Mme: SASSI BOUDEMAGH Souad	Pr	Université de Constanine3	Examinatrice
Mme: BERNOU Randa	MCA	Université de Constanine3	Examinatrice

Remerciement

Je remercie d'abord ALLAH le tout puissant qui m'a guidé et qui m'a donné la force et la volonté de réaliser ce travail.

Je remercie mon Directeur de thèse, Monsieur Bouabaz Mohamed Professeur au département de génie civil université du 20 Août 1955 - Skikda, d'avoir accepté de diriger ce travail avec beaucoup de disponibilité et d'efficacité, pour m'avoir fait partager son expérience, pour les conseils et encouragements qu'il a su me prodiguer pendant toute la durée de cette thèse.

Je tien aussi à remercier également tous les membres du jury pour l'honneur d'apprécier et d'évaluer ce travail de thèse.

Dédicace

Je dédie cette thèse :

A mes très chers parents

A ma chère femme et mes enfants

A mes très chers sœurs frères et mes frères

*A tous les membres de ma famille et tous mes
proches*

A tous mes collègues

Et à tous ceux qui m'ont encouragé et soutenu

Résumé:

La technologie numérique révolutionne tous les aspects de notre vie quotidienne, englobant des activités telles que le commerce, l'éducation, notre engagement avec les médias et la communication, entre autres. Cette modification du cadre technologique, qui réorganise les normes établies dans un domaine profondément conventionnel, nécessite une réévaluation de son approche, de ses outils et des méthodologies dominantes. Aujourd'hui le passage au BIM (Building Information Modling) est devenu inévitable où l'ère numérique a déjà fait le choix pour nous. Au début le BIM n'était appliqué que pour les nouveaux projet de construction de prestige mais en suite il s'est développé pour toucher et cerner tous les travaux en relation avec l'acte de construire y compris la réhabilitation du bâtis, présentant ainsi un des pivots de notre sujet de thèse.

La modélisation des informations du bâtiment (BIM) associée au principe des éléments significatifs a émergé en quantités et en coûts dans l'optimisation de la productivité liée à la réhabilitation du bâtiment où elle a été proposée et discutée. Une étude quantitative et qualitative liée au domaine d'application basée sur certains paramètres tels que le diagnostic pathologique, les documents de projets et les devis quantitatifs a été utilisée pour l'élaboration du modèle au stade préliminaire de ces travaux. L'étude a identifié 14 quantités d'éléments significatifs spécifiés comme valeur de coût sur la base de l'utilisation de la règle de Pareto 80/20, grâce à l'intégration de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) dans l'optimisation de la productivité du travail pour la réhabilitation des bâtiments.

Les résultats de cette étude révèlent la fiabilité et l'amélioration de la productivité du travail grâce à un processus de modélisation des informations du bâtiment intégrant des quantités et des éléments de coût significatifs.

Mots clés : Productivité du travail , Modélisation des informations du bâtiment , Optimisation des coûts, Réhabilitation

ملخص

تُحدث التكنولوجيا الرقمية ثورة في كل جانب من جوانب حياتنا اليومية، بما في ذلك أنشطة مثل التجارة والتعليم وتفاعلنا مع وسائل الإعلام والاتصالات، من بين أمور أخرى. إن هذا التعديل في الإطار التكنولوجي، الذي يعيد تنظيم المعايير الراسخة في مجال تقليدي للغاية، يتطلب إعادة تقييم نهجه وأدواته والمنهجيات السائدة. اليوم أصبح الانتقال إلى BIM (نمذجة معلومات البناء) أمرًا لا مفر منه حيث أن العصر الرقمي قد حدد لنا بالفعل الاختيار. في البداية، تم تطبيق BIM فقط على مشاريع البناء المرموقة الجديدة، ولكنها تطورت بعد ذلك لتشمل وتغطي جميع الأعمال المتعلقة بعملية البناء، بما في ذلك إعادة تأهيل المباني، وبالتالي تقديم محاور لموضوع رسالتنا.

لقد ظهرت نمذجة معلومات البناء (BIM) المرتبطة بمبدأ العناصر الهامة بالكميات والتكاليف في تحسين الإنتاجية المرتبطة بإعادة تأهيل المباني حيث تم اقتراحها ومناقشتها. تم استخدام دراسة كمية ونوعية تتعلق بمجال التطبيق بناءً على معايير معينة مثل التشخيص المرضي ووثائق المشروع وجداول الكميات لتطوير النموذج في المرحلة الأولية من هذا العمل. وحددت الدراسة 14 كمية كبيرة من العناصر المحددة كقيمة التكلفة بناءً على استخدام قاعدة باريتو 20/80، من خلال دمج نمذجة معلومات البناء (BIM) في تحسين إنتاجية العمل لإعادة تأهيل المباني.

تكشف نتائج هذه الدراسة عن موثوقية وتحسين إنتاجية العمل من خلال عملية نمذجة معلومات البناء التي تتضمن كميات كبيرة وعناصر التكلفة.

الكلمات المفتاحية: إنتاجية العمل، نمذجة معلومات البناء، تحسين التكلفة، إعادة التأهيل

Summary

Digital technology is revolutionizing every aspect of our daily lives, encompassing activities such as commerce, education, our engagement with media and communication, among others. This modification of the technological framework, which reorganizes the established norms in a deeply conventional domain, requires a reassessment of its approach, its tools and the dominant methodologies. Today the transition to BIM (Building Information Modling) has become inevitable where the digital age has already made the choice for us. At the beginning, BIM was only applied to new prestigious construction projects, but it subsequently developed to cover and encompass all work related to the act of building, including the rehabilitation of buildings, thus presenting a pivots of our thesis subject.

Building information modeling (BIM) associated with the principle of significant elements has emerged in quantities and costs in the optimization of productivity linked to building rehabilitation where it has been proposed and discussed. A quantitative and qualitative study related to the area of application based on certain parameters such as pathological diagnosis, project documents and bills of quantities was used for the development of the model at the preliminary stage of this work. The study identified 14 significant item quantities specified as cost value based on the use of the Pareto 80/20 rule, through the integration of Building Information Modeling (BIM) into the optimization of labor productivity for the rehabilitation of buildings.

The results of this study reveal the reliability and improvement of labor productivity through a building information modeling process incorporating significant quantities and cost elements.

Keywords: labour productivity , Building Information Modeling , Cost optimisation, Rehabilitation

Table des matières

Introduction générale.....	i
Domaine de la recherche.....	ii
Problématique de la recherche.....	iii
Structure de la thèse.....	v
Chapitre I Le Patrimoine et la Réhabilitation: Aspect Théorique et Technique	
I.1. Introduction.....	1
I.2. Le Patrimoine comme notion.....	2
I.3. Définition du patrimoine:	3
I.3.1. Définition générique:	3
I.3.2. Définition juridique:	3
I.3.3. Définition économique:	4
I.4. Historique de la notion de patrimoine.....	4
I.4.1. Patrimoine bâti.....	5
I.4.2. La réhabilitation.....	6
I.4.3. Définition de la réhabilitation.....	6
I.4.4. La naissance de la réhabilitation.....	7
I.4.5. Les défis de la réhabilitation.....	7
I.4.6. Pourquoi choisir la réhabilitation ?.....	8
I.4.7. Les niveaux de la réhabilitation.....	9
I.4.7.1. Réhabilitation légère.....	9
I.4.7.2. Réhabilitation moyenne :.....	9
I.4.7.3. Réhabilitation lourde :	10
I.4.7.4. Réhabilitation exceptionnelle :	10
I.5. Les fins de la réhabilitation.....	10
I.5.1. Pourquoi réhabiliter	10
I.5.1.1. L'enjeu social de la réhabilitation :	10
I.6. Conclusion :	11
Chapitre II Etat de l'Art	
II.1. Introduction.....	12
II.2. Littérature scientifique du BIM pour la rénovation.....	12
II.3. Etudes traitants l'introduction du BIM dans la réhabilitation, la rénovation et la maintenance des anciens bâtiments.....	13
II.4. Etudes traitant la productivité et l'optimisation de réhabilitation en BIM :	20
II.5. Etudes de revue littérature du BIM.....	28
Chapitre III Enjeux et Positionnement: BIM en Réhabilitation	
III.1. Introduction.....	31
III.2. Le BIM.....	31
III.2.1. Introduction.....	31
III.2.2. Définition du BIM et MN:.....	32

III.3. Naissance et historique du BIM.....	36
III.1. 1 Le BIM autour du monde	40
III.1.2 Au Etats-Unis	41
III.1.1.1. Royaume-Uni.....	41
III.1.1.2. Finlande	41
III.1.3. Autres pays	43
III.1.4. Norvège:	43
III.1.5. Danemark:.....	43
III.1.6. Suède:	44
III.1.7. Chine:.....	44
III.1.8. Australie:.....	44
III.1.9. Russie:.....	45
III.1.10. Singapour:.....	46
III.1.11. France:	46
III.1.12. Algérie:	47
III.2. Le BIM entre Processus et Outil:	47
III.3. Le passage au BIM	49
III.4. La volonté de réduire les émissions de carbone et de gaz à effet de serre	49
III.5. Les différents niveaux du BIM.....	49
III.5.1. BIM Niveau 0	49
III.5.2. BIM Niveau 1	50
III.5.3. BIM Niveau 2	51
III.5.4. BIM Niveau 3	53
III.6. Les composantes du BIM.....	54
III.7.1 Les ressources naturelles disponibles s'amenuisent	55
III.7.2 Améliorer l'efficacité et la qualité de l'industrie de la construction	55
III.7.3 Les Avantages du BIM.....	55
Avantages pour les maîtres d'ouvrage et les développeurs	56
III.7.4 Avantages pour les bureaux d'études, architectes et ingénieurs	56
III.7.5 Avantages lors de la construction et la fabrication, entrepreneurs et fabricants	57
III.7.6 Avantages post construction pour les propriétaires et la gestion de patrimoine	57
Chapitre IV La Productivité de Travail	
IV.1. Introduction :	58
IV.2. Définition de la production:	59
IV.2.1. La productivité partielle:.....	60
IV.2.2. La productivité globale des facteurs « P.G.F ».....	61
IV.3. La mesure de la productivité du travail.....	62
IV.4. Allocation et gestion efficaces des ressources.....	62
IV.5. Construction allégée	63
IV.6. Technologies numériques pour la construction.....	64
IV.6.1. Les logiciels de gestion de la construction	65

IV.6.2. Modélisation des données du bâtiment (BIM).....	66
IV.6.3. Impression 3D.....	66
IV.6.4. Le jumeau numérique du chantier de construction.....	67
IV.6.5. L'internet des objets (IoT).....	67
IV.6.6. Planification des projets.....	68
IV.6.7. Amélioration de la communication	68
IV.6.8. Contrôle de la qualité et gestion des risques.....	69
IV.6.9. Formation et développement de la main-d'œuvre.....	70
IV.7. Conclusion:	71
Chapitre V Développement et Analyse	
V.1. Introduction :	72
V.2. La loi de Pareto (méthode 80-20):	73
V.2.1. Le principe de Pareto	74
V.3. Présentation de cas d'étude:	76
V.3.1. Présentation de la ville de Skikda.....	77
V.3.1.1. Situation et limites de la ville.....	77
V.3.1.2. Climatologie:.....	78
V.3.1.3. Température:	79
V.3.1.4. Vent :.....	79
V.4. Localisation du cas d'étude.....	80
V.5. Diagnostic et étude de réhabilitation.....	82
V.6. Emplacement et localisation.....	82
V.7. Données numériques du cas d'étude.....	89
V.8. La méthode utilisée.....	98
V.9. Le diagramme du Business Process Model and Notation (BPMN).....	98
Chapitre VI : Résultats et interprétation	
IV.1. Le concept de lots de travaux.....	104
IV.2. Estimation des coûts.....	106
IV.3. Précision du modèle	108
IV.4. Signification du modèle.....	108
Conclusion générale.....	110
Référence	111

Liste des figures

Figure II. 1 Répartition des publications issues des bases de données GS et SD Comportant BIM et Renovation, refurbishment, réhabilitation ou retrofit dans le titre Source: Laurent Joblot 2019.....	13
Figure III. 1 Relations entre les étapes du cycle de vie du bâtiment (LC) et les enjeux fonctionnels, informationnels, techniques et organisationnels du BIM.....	33
Figure III. 2 Synthèse des connotations des termes Building Information Modeling selon Succar 2009a.....	35
Figure III. 3 Archicad model de CPU Pride projet à Moscow.....	38
Figure III. 4 Désigne des alternatives en phase d'esquisse par le BIM.....	42
Figure III. 5 Le BIM de l'existant en fin de conception.....	42
Figure III. 6 Méthode traditionnelle comparée à une approche BIM	48
Figure III. 7 Approche historique (pas de modèle explicite, seulement des vues)	50
Figure III. 8 Modèle purement géométrique de dessin assisté par ordinateur (principalement des vues 2D par AutoCAD).....	51
Figure III. 9 Modèle BIM 3D peut être réalisé par logiciel Autodesk Revit, ArchiCAD ou Tekla. Des informations sur les matériaux, les coûts, etc. sont disponibles.....	52
Figure III. 10 Modèle BIM collaboratif, entièrement synchronisé entre tous les partenaires. Fichiers standards (par exemple IFC, COBie).....	53
Figure III. 11 Image très connue du diagramme de BEW et Richards qui représente les niveaux du BIM au Royaume-Uni.....	54
Figure IV. 1 Quantité de fréquence des éléments significatifs	105
Figure IV. 2 Distribution des erreurs en pourcentage total des estimations	107
Figure IV. 3 Ligne de régression des limites supérieure et inférieure de la valeur estimée par rapport à la valeur réelle	107

Figure IV. 4 Tracé linéaire de la valeur réelle par rapport à la valeur estimée.....	109
Figure IV. 5 Histogramme de la valeur réelle par rapport à la valeur estimée	109
Figure V. 1 Exemple de diagramme de Pareto	74
Figure V. 2 Loi de Pareto (Méthode 80-20)	75
Figure V. 3 Situation de la Wilaya de Skikda par rapport aux villes.....	78
Figure V. 4 Graphe d'évolution des moyennes mensuelles des pluies et des températures..	79
Figure V. 5 Graphe des Moyennes mensuelles des vitesses du vent moyen.	80
Figure V. 6 Plan d'intervention pour la réhabilitation des constructions sur l'axe Didouche Mourad.....	81
Figure V. 7 Localisation du projet d'étude de cas.....	82
Figure V. 8 Localisation et Emplacement du Bt 14-2	83
Figure V. 9 Diagnostic et levé d'état de dégradation et des pathologies existantes.....	88
Figure V. 10 Éléments et symboles des BPMN.....	99
Figure V. 11 Map BPMN du processus de réhabilitation traditionnel sans BIM	102
Figure V. 12 Map BPMN du processus de réhabilitation avec BIM.....	103

Liste des tableaux

Tableau IV. 1 Quantités basées sur les éléments significatifs des work packages avec leur degré de fréquence.....	104
Tableau IV. 2 Résultat de l'estimation des quantités	106
Tableau V. 1 Codes des articles du bâtiment B1.....	89
Tableau V. 2 Codes des articles du bâtiment B2	89
Tableau V. 3 Codes des articles du bâtiment B3	90
Tableau V. 4 Codes des articles du bâtiment B4	90
Tableau V. 5 Codes des articles du bâtiment B4 (suite).....	91
Tableau V. 6 Coût moyen par Bâtiment	91
Tableau V. 7 Répartition des fréquences par bâtiment.....	92
Tableau V. 8 Répartition des fréquences par bâtiment (suite).....	93
Tableau V. 9 Les fréquences du coût significatif par lot de travail	72
Tableau V. 10 Valeurs des devis et taux à 7 % et 93 %. du P1 au P7	72

Liste des symboles et abréviations

BIM : Building Information Modeling

MN : Maquette Numérique

CLP : construction Labour Productivity

3D : troisième dimension

4D: quatrième dimension

5D: cinquième dimension

UNESCO: l'organisation des nations unies pour l'éducation la science et la culture

FNOL: le fonds national pour le logement

AECO/FM : l'architecture, l'ingénierie, la construction, les opérations et la gestion des installations

GS: google scholar

SD: science directe

HDB: Housing and development board

BLC: building and construction authority

VSM: cartographie de la chaîne de valeur

HTM: traditionnel Malay house

LEED: leadership in energy and environmental design

DA-HBIMM: modélisation et gestion des informations sur les bâtiments historiques assistées par diagnostic

LPS: Last planner system

LC: lean construction

CAO: conception assistée par ordinateur

FAC: fabrication assistée par ordinateur

MIT: Massachusetts Institute of Technology

PTC: parametric technology corporation

IFC: le format standard de fichier international classé

Benluxe: Belgique, Netherland, luxembourg

Covid19: corona virus 2019

AEC: de l'architecture de l'ingénierie de la construction

ISO: Organisation internationale de normalisation

Cobie: Construction-Operations Building information exchange

PGF: production gain function

IS: la méthode des éléments significatifs

EV: Valeur estimé

RV: Valeur réelle

ACC: erreur moyenne

EQM: erreur quadrique moyenne

Introduction générale

Aujourd'hui la tendance vers le numérique est plus en plus accentué par le développement d'outils informatiques, pratiquement dans tous les domaines notamment dans le secteur du bâtiment, le Building Information Modeling (BIM) est un nouveau processus qui peut fournir à travers ces outils une visualisation 3D de la géométrie du projet, sa structure ainsi qu'une masse importante d'informations sur les éléments composants le projet associé à ce modèle BIM.

Au début le BIM était pour les nouveaux projets de construction, et la réhabilitation de l'anciens bâtis n'as pas resté exclus de cette implémentation du BIM, qui nous intéresse à ce que ce dernier espérant réduit de façon importante le coût et optimise la productivité du travail ainsi que la gestion efficace du projet durant tout le cycle de vie des constructions.

En bâtiment la productivité de travail est l'un des facteurs les plus importants qui affectent les progrès physique de tous projets de construction[1]. Aussi elle peut être l'évaluation de l'efficacité du travail concrètement mesuré au moyen d'un ensemble d'indicateurs où le point commun est de mettre en rapport la quantité produite et la quantité consommée [2]. Actuellement la productivité de travail présente une préoccupation importante dans la pensée des décideurs, mangeurs ou gestionnaires d'entreprises dans le secteur économique, comme à l'industrie des bâtiments et leurs réhabilitation.

Le vieux bâti peut devenir un jour l'objet d'une intervention traduit par une opération de préservation, de rénovation, de réhabilitation ou encore d'entretien ...etc. Ce sont généralement des opérations dont l'objectif est de regagner les qualités architecturales perdus au file de temps à cause des plusieurs facteurs et pathologie.

Dans cette thèse nous étudions la possibilité d'optimiser la productivité de travail dans la réhabilitation des bâtiments du centre historique de la ville de Skikda, la rue Didouche Mourad (les arcades) comme cas d'étude par recours à un nouveau processus de travail collaboratif et alimenter la maquette numérique suivant une modélisation des information du bâtiment (BIM) associée au principe des éléments significatifs émergé en quantités et en coûts liées à la réhabilitation du bâtiment. L'étude a identifié 14 quantités d'éléments significatifs spécifiés comme valeur de coût sur la base de l'utilisation de la règle de Pareto 80/20.

Domaine de la recherche

Le Building Information Modeling (BIM) a émergé comme un catalyseur essentiel pour la promotion du développement durable dans le domaine de la réhabilitation des bâtiments. Cette technologie offre une approche holistique et intégrée qui va au-delà de la simple modélisation 3D, permettant une gestion plus efficace des ressources et une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre (GES) associées aux projets de construction et de réhabilitation.

L'un des aspects clés où le BIM impacte positivement le développement durable est l'optimisation énergétique des bâtiments réhabilités. En modélisant en détail les systèmes mécaniques et électriques existants, le BIM permet une analyse approfondie des performances énergétiques. Les professionnels peuvent ainsi identifier des opportunités d'efficacité énergétique, recommandant des améliorations spécifiques pour réduire la consommation d'énergie et, par extension, les émissions de GES. Cette approche proactive favorise la transformation des bâtiments existants en structures plus écologiques et économes en énergie.

La technologie BIM facilite également la prise de décision basée sur des critères durables lors du choix des matériaux de réhabilitation. En intégrant des informations détaillées sur les matériaux existants dans le modèle BIM, les équipes de conception peuvent évaluer l'impact environnemental de chaque composant. Cette évaluation approfondie encourage la sélection de matériaux durables, réduisant ainsi l'empreinte carbone globale du projet et promouvant des pratiques de construction responsables.

La réduction des déchets de construction est un autre avantage significatif du BIM en réhabilitation. Grâce à une planification précise des travaux, le BIM minimise les erreurs sur le chantier, évitant ainsi les excédents de matériaux inutiles. La réduction des déchets de construction devient ainsi une réalité, contribuant à la réduction des émissions de GES associées à la fabrication et à l'élimination de matériaux de construction.

La gestion du cycle de vie du bâtiment est une dimension essentielle du BIM en réhabilitation. En couvrant l'ensemble du processus, du stade de la conception à celui de la construction, en passant par l'exploitation et la maintenance, le BIM favorise une approche durable. Les décisions prises tout au long de ce cycle intègrent des considérations à long terme, contribuant

Introduction générale

ainsi à une réduction continue des émissions de GES pendant toute la durée de vie du bâtiment.

La technologie BIM optimise également le transport et la logistique liés aux projets de réhabilitation. Une planification précise des travaux évite les déplacements inutiles des travailleurs et des matériaux, réduisant ainsi la consommation de carburant et les émissions associées. Cette gestion plus responsable des ressources contribue directement à la lutte contre le changement climatique.

Enfin, le BIM peut être appliqué pour modéliser les systèmes de plomberie et les infrastructures liées à l'eau. En identifiant les opportunités d'efficacité hydrique, telles que la réparation de fuites ou l'installation de dispositifs de conservation de l'eau, le BIM aide à minimiser la consommation d'eau et les émissions liées à son traitement.

En conclusion, le BIM en réhabilitation représente une avancée majeure vers un avenir plus durable dans le secteur de la construction. En intégrant des aspects économiques, écologiques et sociaux, le BIM offre une approche complète qui va au-delà de la simple construction de structures physiques. Il s'impose comme un outil essentiel pour la transformation des bâtiments existants en infrastructures plus efficaces, durables et respectueuses de l'environnement.

Problématique de la recherche

La réhabilitation des bâtiments en utilisant le Building Information Modeling (BIM) pose plusieurs problématiques, notamment celle liée à l'estimation du coût de l'opération. Cette question est cruciale car une estimation précise est essentielle pour planifier le budget, garantir la viabilité financière du projet et éviter les dépassements de coûts. Plusieurs aspects contribuent à la complexité de l'estimation des coûts dans le contexte de la réhabilitation des bâtiments avec le BIM.

Données initiales incomplètes ou inexactes : Souvent, les bâtiments destinés à la réhabilitation ont des données existantes limitées, obsolètes ou inexactes. La qualité des informations initiales peut grandement influencer la précision de l'estimation des coûts. Le BIM s'efforce de résoudre ce problème en créant un modèle numérique détaillé de la structure existante, mais la qualité de ce modèle dépend de la disponibilité de données précises.

Introduction générale

Intégration de données multiples : La réhabilitation peut impliquer des changements dans plusieurs aspects du bâtiment, tels que la structure, les systèmes mécaniques, électriques, et la plomberie. L'intégration de toutes ces données dans un modèle BIM cohérent peut être complexe, nécessitant une collaboration étroite entre différentes équipes de professionnels. Des erreurs ou des omissions dans cette intégration peuvent conduire à des estimations de coûts inexacts.

Complexité des projets de réhabilitation : Les projets de réhabilitation sont souvent plus complexes que les nouvelles constructions en raison des contraintes liées à la structure existante. L'adaptation du modèle BIM à ces spécificités peut être difficile, et les défis imprévus sur le chantier peuvent entraîner des ajustements coûteux.

Évolution des exigences réglementaires : Les réglementations en matière de construction évoluent avec le temps. Les projets de réhabilitation peuvent être confrontés à des exigences légales et normatives différentes de celles qui étaient en vigueur lors de la construction initiale. Ces changements peuvent entraîner des coûts supplémentaires qui n'ont pas été initialement pris en compte.

Incertitudes liées aux découvertes pendant la réhabilitation : Les surprises imprévues, telles que des problèmes structurels cachés ou des dégâts non détectés, peuvent surgir pendant la phase de réhabilitation. Le BIM peut atténuer certains de ces risques en permettant une modélisation plus détaillée, mais il ne peut pas anticiper toutes les éventualités.

La problématique centrale derrière l'estimation des coûts dans la réhabilitation des bâtiments avec le BIM réside dans la nécessité de concilier des données initiales souvent incomplètes avec la complexité des projets de réhabilitation. Il s'agit de trouver des méthodes efficaces pour collecter, intégrer et modéliser ces données, tout en gérant les incertitudes inhérentes au processus de réhabilitation. Une approche collaborative, l'utilisation judicieuse de technologies avancées de modélisation, et une gestion proactive des risques sont essentielles pour relever ces défis et aboutir à des estimations de coûts plus précises dans le contexte du BIM en réhabilitation des bâtiments.

Structure de la thèse

Afin de répondre au problématique énoncée précédemment, nous analysons dans un **premier chapitre**, le patrimoine bâti qui constitue un témoignage précieux de l'histoire architecturale et culturelle. Cependant, sa préservation et sa réhabilitation nécessitent une approche théorique et technique bien éclairée. Dans ce contexte, ce premier chapitre explore les fondements du patrimoine et de la réhabilitation, mettant en lumière les aspects théoriques et techniques qui sous-tendent cette démarche complexe.

Dans un **deuxième chapitre** dédié à l'état de l'art du Building Information Modeling (BIM) appliqué à la réhabilitation. En scrutant les avancées récentes et les meilleures pratiques, ce volet offre un aperçu approfondi des outils et des méthodologies qui façonnent l'union entre le BIM et la préservation du patrimoine bâti.

Dans le **troisième chapitre**, l'accent se déplace vers les enjeux et le positionnement stratégique du BIM en réhabilitation. Quelles sont les opportunités et les défis que cette convergence présente ? Comment le BIM peut-il être intégré de manière optimale pour relever ces défis tout en exploitant les opportunités inhérentes à la préservation du patrimoine ?

Dans le **quatrième chapitre** nous traitons la notion de la productivité de travail et les domaines d'application du BIM dans le contexte spécifique de la réhabilitation. Comment le BIM influence-t-il la gestion des ressources, la coordination des équipes, et quels sont les secteurs où son impact se fait le plus sentir dans le cadre des projets de préservation du patrimoine ?

Dans un **cinquième chapitre** une étude de cas concrets était réalisé. À travers l'analyse détaillée des devis des projets réels de réhabilitation, et exploré les résultats obtenus grâce à l'application de la méthode de Pareto également nommée règle des 80/20, en choisissant les éléments de la construction qui ont une valeur significative très influente, sur l'évaluation ou l'estimation du coût des travaux envisagés pour l'opération de réhabilitation, afin les appliquer dans d'autres nouveaux projets dans le domaine de la réhabilitation avant le démarrage réel des travaux sur site (dans la phase avant projet). Pour pouvoir enfin participer de façon

Introduction générale

bénéfique et positive en faisant alimenter la maquette numérique en informations utiles et pratiques sur le coût globale des travaux de réhabilitation ainsi que les éléments de la construction. portant une valeur signifiante et optimisé la productivité de travail dans la réhabilitation des bâtiments

Chapitre I
Le Patrimoine et la Réhabilitation:
Aspect Théorique et Technique

I.1. Introduction

Le souci de préserver le patrimoine est devenu un sujet de plus en plus important dans les sociétés contemporaines. Cela est dû à la reconnaissance de l'importance de la transmission et de la préservation du patrimoine, ainsi qu'à la compréhension de son rôle essentiel dans le développement de villes durables. La préservation du patrimoine est considérée comme cruciale pour garantir une meilleure qualité de vie et constitue donc un aspect clé des discussions sur les villes durables. Il est largement reconnu que le patrimoine est une ressource précieuse et irremplaçable qui doit être protégée et utilisée. Le patrimoine possède une valeur à la fois économique et culturelle, contribuant à la qualité de vie globale des villes et améliorant leur image. En outre, le patrimoine joue un rôle important dans le développement économique, en particulier dans l'industrie du tourisme. En outre, le patrimoine sert de pont entre le passé, le présent et le futur, procurant un sentiment de continuité face à l'expansion urbaine rapide. Il témoigne des valeurs de la société, qui englobe les dimensions émotionnelles, culturelles, symboliques et sociales. Le processus de préservation du patrimoine repose sur la reconnaissance et la priorisation de ces valeurs, impliquant diverses parties prenantes telles que les résidents, les propriétaires et les acteurs publics et privés. Cependant, des conflits surviennent souvent en ce qui concerne les valeurs à promouvoir et les stratégies d'intervention. Ces conflits constituent d'importantes opportunités de débat, de justification et de formation d'alliances et de relations de pouvoir. En fin de compte, les multiples valeurs associées au patrimoine sont façonnées par les intérêts et les points de vue des acteurs concernés, qui peuvent parfois être contradictoires et difficiles à concilier.

Selon le rapport sur l'exécution de la Convention du patrimoine mondial de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), le patrimoine est considéré comme le patrimoine commun d'une nation, ainsi que de l'humanité tout entière : « Le patrimoine est classé comme l'un des biens inestimables et irremplaçables appartenant non seulement à chaque nation, mais à l'ensemble de la race humaine ». La préservation du patrimoine est de la plus haute importance : « Toute perte, qu'elle soit due à la détérioration ou à la disparition, de ces biens particulièrement précieux signifie un appauvrissement du patrimoine appartenant à tous les habitants du monde. » Ce patrimoine englobe à la fois les ressources naturelles et les biens culturels, y compris le patrimoine urbain et architectural [3].

La compréhension de l'objet de recherche nécessite une compréhension approfondie de la dimension théorique, qui s'est façonnée au fil du temps. L'évolution historique de la notion de patrimoine, ainsi que les définitions, les concepts et les valeurs qui l'englobent et la distinguent, constituent cet aspect théorique. D'autre part, l'aspect technique fait référence aux processus et opérations utilisés pour intervenir sur un actif donné, englobant des activités telles que la réhabilitation, la restauration, la conservation et même la reconversion. En outre, cet aspect technique peut également englober une terminologie spécialisée qui explique ces diverses opérations et la conservation des biens et des valeurs associés à ce patrimoine.

Il convient de reconnaître que nous employons un nombre important de termes susceptibles de prêter à confusion. Par conséquent, une définition précise des concepts utilisés dans nos recherches est indispensable afin d'améliorer notre compréhension du sujet. Chaque édifice du tissu urbain et du noyau historique joue un rôle unique et doit être restauré pour remplir sa fonction contemporaine tout en préservant ses caractéristiques et ses structures d'origine.

I.2. Le Patrimoine comme notion

L'objectif de ce passage est donc d'approfondir notre compréhension du concept en explorant les aspects théoriques et techniques qui s'y rapportent.

La singularité du patrimoine réside dans son abondance et sa variété et nécessite d'être considéré sous deux angles : d'abord, l'aspect théorique, puis l'aspect technique. L'aspect théorique, crucial pour comprendre dans quel cadre entre notre thématique, découle de l'histoire évolutive du concept de patrimoine, de ses définitions, de ses concepts et des valeurs associées. L'aspect technique concerne les processus et les actions employés pour intervenir sur un actif particulier, comme la réhabilitation, la restauration, la conservation ou même la reconversion. En outre, cet aspect englobe une terminologie distincte qui explique ces diverses opérations et protège les atouts et les valeurs de ce patrimoine. Il est important de reconnaître que nous employons un grand nombre de termes susceptibles de prêter à confusion. Chaque bâtiment du tissu urbain et du centre historique assume son rôle unique et doit retrouver une fonction contemporaine tout en préservant ses caractéristiques et ses structures d'origine. Par conséquent, ce chapitre vise à améliorer notre compréhension du thème en explorant les aspects théoriques et techniques qui lui sont intrinsèques.

I.3. Définition du patrimoine:

Le terme patrimoine du latin "*patrimonium*", dérivant de *pater*, père désigne dans son sens commun l'ensemble des biens hérités du père et de la mère et l'ensemble des biens de la famille, nous indique le petit Larousse illustré 2010. Issu du vocabulaire juridique, le mot patrimoine par extension désignait en France les biens de l'église, les biens de la couronne, au 18e siècle les biens de signification et valeur nationales. Aujourd'hui, le terme patrimoine s'est mis à exprimer la totalité des biens hérités du passé, du plus lointain au plus proche, soit d'ordre culturel (du tableau, ou du livre au paysage organisé par l'homme) ou soit d'ordre naturel (ressources, sites ou « monuments » naturels)[4].

La valeur de patrimoine s'octroi à un bien existant où l'usage et les qualités dépassent l'usage, cette valeur impose sa protection et sa conservation. Le sens attribué au terme « patrimoine » varie selon les disciplines en fonction des diverses applications et contextes dans lesquels il est utilisé.

I.3.1. Définition générique:

Le patrimoine culturel, architectural, génétique et oral est la manifestation des éléments précieux transmis par les deux parents, ou des biens communs d'une communauté ou d'un groupe humain particulier, transmis de génération en génération. Le terme « patrimoine » est défini comme la transmission de biens et de caractéristiques des ancêtres à leur descendance, comme l'indique le Dictionnaire de la langue française par E. Littré. Initialement associé aux cadres familial, économique et juridique d'une société stable, le patrimoine a évolué pour devenir un concept à multiples facettes grâce à l'ajout de divers adjectifs tels que génétique, naturel et historique.

I.3.2. Définition juridique:

Le terme « patrimoine » englobe tous les biens et ressources qui appartiennent à un individu ou à une personne morale. Ces actifs comprennent les droits et les activités associés. Lorsqu'une personne décède, le terme « héritage » est utilisé pour décrire l'ensemble des biens de la personne décédée, qui sont ensuite sujets à division. Alternativement, le terme « succession » peut également être utilisé dans ce contexte.

I.3.3. Définition économique:

Le patrimoine englobe l'ensemble des biens appartenant à un individu, comprenant à la fois des actifs corporels (personnels) et immatériels (des entreprises). Par conséquent, cette personne possède le potentiel de revendiquer la propriété d'un bien ou d'un droit qui peut être transféré contre une valeur monétaire. Le patrimoine peut provenir d'une succession héritée, mais il peut également comprendre des biens acquis indépendamment par l'individu. Il convient de noter que le patrimoine englobe non seulement des actifs, mais également des passifs et des responsabilités.

Les historiens : affirment que le patrimoine constitue une exposition complète de l'état actuel du passé et englobe simultanément une chronique du présent.

Les sociologues : Le patrimoine et le lieu social sont les constituants de l'identité.

Les économistes: Postulent que la richesse peut être assimilée à un réservoir d'actifs, susceptible de générer des revenus, établissant ainsi son identité de capital, englobant diverses composantes conceptualisées comme des ressources économiques.

I.4. Historique de la notion de patrimoine

Le concept de patrimoine, qui englobe tous les membres d'une communauté, remonte à l'Antiquité. En fait, la première étude complète des monuments historiques a été menée par Philon de Byzance en 29 avant JC, au cours de laquelle il a documenté les sept merveilles du monde antique. Fort de cette prise de conscience du patrimoine urbain collectif, le Sénat romain avait déjà promulgué des lois dès 44 avant notre ère pour interdire la vente de matériaux récupérés dans des bâtiments détruits[5]. En outre, le Senatus Consulte du 22 avril 1863 a spécifiquement interdit la vente d'un bâtiment sans ses décorations d'origine, telles que des mosaïques, des fontaines, des sculptures et des peintures murales. Ces mesures législatives visaient à lutter contre le vol, le vandalisme et le commerce illicite d'objets culturels. C'est au cours de cette période que la préservation et la conservation des chefs-d'œuvre artistiques ont commencé à émerger, en particulier en Italie pendant la Renaissance. Un intérêt croissant pour les anciens bâtiments et œuvres d'art romains a marqué la naissance du concept de monuments historiques. Le siècle des Lumières en France a encore renforcé la conscience historique, l'attention étant dirigée vers les monuments du passé. Ces monuments, souvent de nature religieuse, ont été jugés dignes d'être préservés pour leur valeur esthétique.

Cependant, ce n'est qu'après la Révolution française que la notion moderne de patrimoine et son importance en tant que bien collectif pour l'ensemble de la nation ont véritablement pris racine. Le terme « patrimoine » lui-même a évolué au fil du temps, et sa signification contemporaine a pris forme au début du XIXe siècle. Il transmet désormais l'authenticité, la valeur et le respect de certains objets et traditions. Il est intéressant de noter que le mot « patrimoine » a été utilisé pour la première fois pendant la Révolution française, mais a été rapidement abandonné en raison de sa nature ambiguë. Cependant, il a refait surface dans les années 1960 pour désigner les monuments historiques et remplacer partiellement d'autres expressions. Enfin, en 1978, le terme « monument historique » a été remplacé par le terme plus général de « patrimoine ».

I.4.1. Patrimoine bâti

L'Algérie possède un patrimoine urbain et architectural important qui présente des particularités régionales. Dans la région sud, le patrimoine est marqué par des influences mozabites, tandis que dans la région centrale, il est influencé par les traditions kabyles. D'autre part, le patrimoine urbain et architectural du nord du pays, reflète différents styles. Malgré ce riche héritage, les politiques urbaines ont largement accordé la priorité à l'expansion des villes, négligeant la gestion de ce précieux héritage, en particulier la préservation des zones centrales des villes [6]. En 1958, le gouvernement français a formulé le « Plan Constantine » (1959-1963), qui visait à construire 200 000 logements. Cependant, après l'indépendance en 1962, l'État algérien a été confronté à de multiples défis liés à la croissance et aux mouvements de population, qui ont entraîné une série de situations d'urgence. En conséquence, l'État a réorienté ses efforts vers la construction de nouveaux logements, passant de 15 000 unités par an en 1967 [7] à plus de 150 000 unités par an vers 1985, pour finalement atteindre 300 000 logements par an en 2008 [8]. Tout en assumant la responsabilité de l'entretien des bâtiments, l'État a mis en œuvre des processus réglementaires impliquant les locataires dans la conservation des propriétés. Néanmoins, les ressources financières limitées de l'État, combinées aux dépenses élevées liées à l'entretien des bâtiments, ont entraîné un changement de politique. En 1981, l'État a décidé de vendre ses propriétés à des locataires. Malgré la mise en place de règles de gestion des copropriétés, le parc immobilier occupé a rencontré des difficultés en termes d'entretien et de préservation. Par conséquent, la nouvelle politique s'est révélée inefficace, aggravant la détérioration des anciens quartiers qui constituaient le tissu d'origine de la ville.

I.4.2. La réhabilitation

Le fait d'améliorer une structure tout en préservant son objectif principal ou d'aligner une résidence ou une structure sur les réglementations contemporaines (telles que les réglementations relatives au confort électrique et sanitaire, le chauffage, l'isolation thermique et phonique, les dispositifs de confort, etc.) est appelé amélioration du bâtiment (General Building Dictionary, 2008).

Il existe différentes approches de la réhabilitation des bâtiments, notamment la préservation des bâtiments en les réparant si nécessaire avec des matériaux contrastants pour distinguer clairement le neuf des anciens. La rénovation de bâtiments anciens constitue également une approche importante en matière d'économie d'énergie et de réduction des émissions avec de faibles coûts économiques. La réhabilitation et la reconstruction des bâtiments et des installations sont des sujets de discussion lors de conférences et de recherches, en mettant l'accent sur le traitement des surfaces, les propriétés des structures et les développements pratiques .

I.4.3. Définition de la réhabilitation

Terme de jurisprudence dans son sens premier, la réhabilitation signifie l'action de rétablir une personne dans ses droits, au figuré le fait de faire recouvrer l'estime ou la considération révèle le petit Larousse illustré 2010.

Par extension dans le domaine du bâti, le concept de réhabilitation désigne selon une première source, les procédures visant la remise en état d'un patrimoine architectural et urbain longtemps déconsidéré et ayant récemment fait l'objet de revalorisation économique, pratique et/ou esthétique, qu'il s'agisse de tissu et architecture mineurs à vocation d'habitat, ou d'ensembles et bâtiments industriels (usines, ateliers, habitat ouvrier,...etc.).

Le terme de réhabilitation est aussi défini, comme l'action d'améliorer un édifice en conservant sa fonction principale, cela en précisant que le terme s'emploie aussi bien, pour des modifications légères, que pour des restructurations lourdes et n'excluant pas l'adjonction d'une partie neuve. Enfin, une tierce définition consultée présente la réhabilitation, par l'amélioration des bâtiments, pouvant se réaliser par des travaux de réparation, d'aménagement et de transformation dans le bâtiment.

I.4.4. La naissance de la réhabilitation

La réhabilitation, en tant qu'entreprise architecturale, est apparue en Europe à la fin des années 1960 en réponse à la destruction massive des centres urbains qui a eu lieu après la Seconde Guerre mondiale. Les Italiens ont été les premiers à contrer les allégations d'insalubrité dans les centres-villes, plaidant pour la préservation de la mémoire et de la continuité urbaine. En opposition au réflexe hygiénique désuet qui dénigrait les structures existantes, les vieux bâtiments ont été accusés d'être construits de manière économique et de ne pas répondre aux besoins modernes et aux normes d'hygiène [9]. En Algérie, l'importance historique des anciennes villes coloniales n'a été reconnue qu'après la destruction malheureuse et irréversible de certains bâtiments, entraînant le déplacement et la relocalisation de leurs occupants. Par la suite, la réhabilitation est devenue une entreprise proactive vers la fin des années 1990, visant à améliorer les centres anciens grâce à deux objectifs principaux : améliorer l'habitabilité et améliorer l'appréciation du patrimoine. Cela a marqué une évolution vers des pratiques correctives et adaptatives, contrastant avec l'approche précédente de démolition systématique. La réhabilitation s'est même étendue à des sites dont la valeur patrimoniale n'avait pas été pleinement reconnue, offrant une perspective critique sur le consensus évolutif et parfois fragmenté concernant la valeur des bâtiments patrimoniaux.

I.4.5. Les défis de la réhabilitation

La réhabilitation, dans un sens plus large, concerne la restauration d'anciens bâtiments et monuments. Des cas de réhabilitation peuvent être observés dans les interventions suivantes:

- Les réparations et les adaptations aux technologies modernes (telles que l'assainissement et l'intégration de panneaux solaires), ainsi que les mesures visant à remédier aux dysfonctionnements résultant d'aléas climatiques ou de tremblements de terre.
- Modernisation des éléments résidentiels (individuels ou collectifs) pour les mettre en conformité avec les normes légales ou pour améliorer le confort, y compris l'intégration de mesures de sécurité dans les bâtiments publics présentant des risques pour la santé des occupants.

- La préservation et l'amélioration du patrimoine architectural des bâtiments, des quartiers, des villes, des ports, etc., afin de mettre en valeur leur importance historique.
- Altérations de la configuration de l'image (qu'elle soit sociale, économique, locale, nationale ou internationale), notamment en ce qui concerne le tourisme.

I.4.6. Pourquoi choisir la réhabilitation ?

La réhabilitation, également communément appelée rénovation dans le domaine de la réparation, est une forme de communication qui s'adapte de plus en plus à l'époque contemporaine. Sa terminologie est fréquemment utilisée pour caractériser une telle maintenance destinée au grand public. À l'heure actuelle, ces termes sont utilisés par les organes directeurs au lieu du terme plus historique de « curetage urbain » pour communiquer avec le public. Par conséquent, la réhabilitation des bâtiments consiste à améliorer l'environnement construit d'un point de vue physique et social. Dans le cadre de la réhabilitation, nous pouvons utiliser les techniques susmentionnées, en distinguant leur utilisation dès que l'orientation du bâtiment est plus contemporaine. Le coût de la réhabilitation est souvent inférieur à celui de la démolition et de la reconstruction, et l'étude menée pour chaque cas répond toujours à l'exigence d'adaptation du logement au nouveau mode de vie. La réhabilitation va au-delà de l'échelle des bâtiments individuels et englobe également l'environnement et tous les sites urbains qui ont été abandonnés en raison d'une perte d'attractivité.

L'étude de cas se déroule dans la ville de Skikda, située dans la région nord-est de l'Algérie. Le projet de requalification se concentre sur le centre historique de Skikda, qui s'étend sur une superficie de 40 hectares. Avec une population de plus de 25 000 habitants, Le projet en question est entièrement financé par l'État à travers le Fonds national pour le logement (F.O.N.A.L) en 2011. Le budget alloué s'élève à 1 500 000 000 de dinars algériens, soit 130 millions d'euros. Le délai de réalisation est fixé à 9 mois à compter du 11/01/2015. Initié en 2011, le projet a débuté par la restauration du boulevard Didouche Mourad, l'artère principale du quartier. L'intention est d'englober à terme l'ensemble du district napolitain. Dans le centre historique de Skikda, vous trouverez un ensemble de bâtiments administratifs, notamment le siège de la wilaya, l'Assemblée populaire communale, le tribunal, les centres de suretés et de la police, ainsi qu'un nombre important d'établissements commerciaux, de marchés traditionnels et de marchés couverts[9].

Le processus de réhabilitation constitue un moyen de communication efficace, en particulier à l'époque contemporaine où adaptabilité et rénovation sont des termes courants dans le domaine des réparations. Ces termes sont fréquemment employés à des fins descriptives et sont souvent utilisés par des personnes non spécialisées pour communiquer avec le public, par opposition au terme plus historique de « curetage urbain ». La

réhabilitation des bâtiments implique donc l'amélioration des aspects physiques et sociaux de l'environnement bâti. Alors que les techniques précédentes peuvent être utilisées dans le contexte de la réhabilitation, l'accent est mis sur les structures contemporaines. Les coûts de réhabilitation sont généralement inférieurs à ceux de la démolition et de la reconstruction, et les études menées pour des cas individuels tiennent toujours compte de la nécessité d'adapter les logements à l'évolution des modes de vie. En outre, la réhabilitation va au-delà de l'échelle des bâtiments et englobe l'environnement environnant et toutes les zones urbaines abandonnées en raison d'une baisse d'attractivité. Dans les domaines du génie civil et de l'architecture, le concept de réhabilitation englobe le processus de rajeunissement de locaux, de bâtiments ou d'espaces, tels que des quartiers ou des espaces verts. Ce procédé permet de préserver l'aspect extérieur du bâtiment tout en améliorant le confort intérieur.

I.4.7. Les niveaux de la réhabilitation

Quatre niveaux de réhabilitation sont distingués selon le rapport SIMON NORA de 1975 en France :

I.4.7.1. Réhabilitation légère

Elle consiste en l'installation d'un équipement sanitaire complet avec salle d'eau (y compris les canalisations, l'électricité et les peintures accompagnant ces agencements).

Elle ne comporte pas de travaux sur les parties communes de l'immeuble, ni l'installation d'un chauffage central.

I.4.7.2. Réhabilitation moyenne :

En plus de l'installation d'un équipement sanitaire cité plus haut, la réhabilitation moyenne implique des travaux plus complets, concernant les parties privatives de l'immeuble à l'intérieur des logements, comme :

- la réfection de l'électricité et des peintures ;
- l'ajout du chauffage central ou électrique avec amélioration de l'isolation thermique et changement des fenêtres.

En règle générale, les distributions intérieures du logement et les cloisonnements ne sont pas modifiés sur les parties communes de l'immeuble, des travaux légers sont entrepris, tels que, peinture des cages d'escalier et ravalement des façades sans reprise des toitures.

I.4.7.3. Réhabilitation lourde :

En plus des travaux décrits ci-dessus, il est prévu une redistribution des pièces dans le logement par modification ou suppression de cloisons ou une redistribution des logements, étage par étage. L'intervention est beaucoup plus complète sur les parties communes de l'immeuble ainsi :

- réfection des façades avec amélioration (isolation par l'extérieur par exemple) ;
- réfection des toitures (couvertures et toitures, terrasses).

I.4.7.4. Réhabilitation exceptionnelle :

Cette opération est préconisée dans le cas où les désordres ou l'état de la structure menace, l'intégrité et la stabilité de l'ouvrage, alors, on reprend les structures, voire les fondations avec renforcement éventuel.

C'est le cas notamment, d'immeubles dont les façades sont classées et nécessairement conservées avec restauration (nettoyage, réparation), alors que la structure intérieure (planchers, refends porteurs) est entièrement reconstruite.

I.5. Les fins de la réhabilitation

Il est essentiel de savoir avant de décider d'engager une opération de réhabilitation, pourquoi et pour qui réhabiliter, c'est faute de s'être posé ce genre de questions, que certains maîtres d'ouvrage ont eu à gérer des situations difficiles après l'achèvement des travaux.

I.5.1. Pourquoi réhabiliter

La décision d'engager une opération de réhabilitation est toujours tributaire de la satisfaction de certains enjeux, qui diffèrent selon les contextes, parfois ces enjeux sont d'ordre social, économique, patrimonial et même environnemental.

I.5.1.1. L'enjeu social de la réhabilitation :

Dans cette perspective, on décide souvent de réhabiliter un bâti existant, des immeubles d'habitation en exemple, afin d'offrir de bonnes conditions d'habitat à une population

attachée à son quartier et dont le déplacement risquerait de fragiliser l'équilibre social de la ville.

I.6. Conclusion :

La présentation de ce chapitre nous a permis d'élucider les données théoriques qui se rapportent à notre champ de recherche, à savoir la réhabilitation du patrimoine bâti ancien. la réhabilitation du patrimoine bâti ancien dans le but de le conserver, est une préoccupation citoyenne et humaine, qui concerne davantage l'humanité. A cet égard, il est un devoir de mettre en œuvre toute les dispositions et mécanismes nécessaires, dans le but de promouvoir l'amélioration de notre cadre de vie en tant que mode d'intervention visant, la conservation du patrimoine bâti, en revanche il faut donner une part du lion au mode d'intervention, qui peut concerner la conservation de la majeure partie du patrimoine bâti dit "mineur".

Chapitre II

Etat de l'Art

II.1. Introduction

L'architecture, l'ingénierie, la construction, les opérations et la gestion des installations (AECO/FM) L'industrie est très dynamique et avec l'avènement de la technologie, il devient désormais possible d'avoir un niveau de contrôle sans précédent sur presque toutes les étapes d'un projet. L'industrie étant de nature très fragmentée, plusieurs tentatives ont été faites pour surmonter les défis d'échange efficace d'informations entre les personnes et les processus

La modélisation des informations du bâtiment (BIM) est largement reconnue comme l'une des principales avancées technologiques. avancées qui ont eu de plus en plus d'impact sur le secteur de la construction au fil des années, car elles permettent les parties prenantes pour capturer et échanger des informations tout au long du cycle de vie d'un bâtiment projet de construction. Cette plate-forme a été utilisée pour combler le fossé d'interopérabilité entre acteurs de l'industrie, renforçant ainsi sa popularité auprès des clients et des parties prenantes. Le BIM, c'est maintenant considéré comme un facilitateur de l'intégration, de l'interopérabilité, de la collaboration et de l'automatisation des processus dans le secteur de la construction (Isikdag et Zlatanova 2009b). En vue d'une transposition au périmètre de notre étude, et pour davantage de pertinence, une étude approfondie des données scientifiques disponibles et cependant nécessaire.

II.2. Littérature scientifique du BIM pour la rénovation

L'examen et la compréhension des données accessibles qui soulignent le lien ou l'importance du BIM pour le secteur de la réhabilitation sont les éléments fondamentaux du lancement de cette entreprise de recherche. Au début de cette thèse, l'étude de la littérature des publications comportant le BIM (Building Information Modeling/Modeling) dans le titre a révélé plus de 80 500 réponses liées à la construction sur des bases de données telles que Google Scholar (GS), et environ 7671 sur Science Direct (SD). Ces chiffres soulignent l'enthousiasme scientifique qui accompagne l'adoption progressive de ces nouvelles méthodologies opérationnelles dans le domaine de la construction. Cependant, après l'inclusion des mots réhabilitation, rénovation, du bâtiment existant dans le titre, seuls 1 630 éléments ont été sélectionnés. Une augmentation significative de nombre de publication dans environ six ans, par rapport à ce que était indiquent sur les distributions illustrées à la Figure II.1 dans les recherches de Laurent Joblot en 2019 [10].

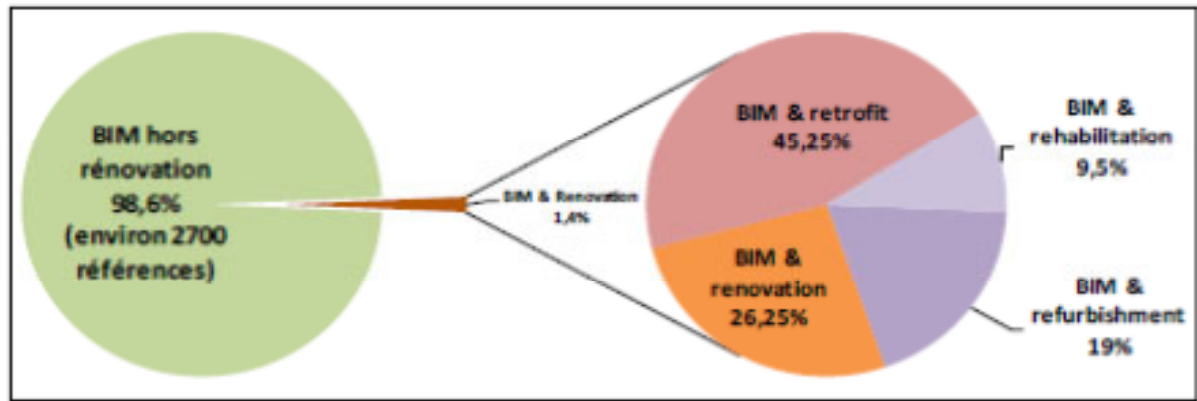


Figure II. 1 Répartition des publications issues des bases de données GS et SD Comportant BIM et Renovation, refurbishment, réhabilitation ou retrofit dans le titre
Source: Laurent Joblot 2019

II.3. Etudes traitant l'introduction du BIM dans la réhabilitation, la rénovation et la maintenance des anciens bâtiments

Marcelle Blanch .M (2022) [11]. Dans son article intitulé: *Integration and impact of BIM in the rehabilitation of buildings in developing countries*. Dans cette étude les chercheurs ont étudié une méthode de BIM en réhabilitation des bâtiments au Cameroun, un pays africain qui est encore à ses balbutiements en matière d'adoption du BIM, et ont comparé cette approche à l'approche séquentielle conventionnelle de livraison du projet. La méthode BIM proposée par ces chercheurs a permis de réaliser des économies de 22% en budget et de gagner jusqu'à 31 % de temps. Les résultats de cette recherche encouragent davantage l'utilisation de la méthode BIM en réhabilitation proposée par Marcelle Blanch .M et al dans les pays en développement pour enfin avoir apprécié l'avantage du BIM en terme d'économie de coût et du temps dans ce type de projet.

Alcinia Zita. S (2015) [12]. dans ses travaux intitulé: *Maintenance of Buildings Using BIM Methodology*. dans ce travail les chercheurs ont contribué à démontrer non seulement qu'il existe encore des problèmes concernant l'interopérabilité entre les logiciels BIM, mais également les avantages de l'utilisation du BIM à des fins de maintenance des bâtiments. et pour mener ce travail ils ont appliqué ils ont construit un modèle d'informations (BIM) - application Visuel Basic, une fiche d'inspection a été élaborée pour améliorer les contrôles techniques et démontrer le potentiel du BIM pour la maintenance des bâtiments. Et comme

résultats ils ont abouti à la mise en œuvre d'un outil logiciel pour la maintenance des bâtiments utilisant la méthodologie BIM , Aussi démontrés les avantages d'utilisation du BIM à des fins de maintenance des bâtiments.

L'étude de Maria Joao Falcao Silva (2021) [13]. Intitulé: *Building Functional Rehabilitation Based on BIM Methodology*. Dans cet article, les auteurs présentent une étude dans laquelle la méthodologie BIM est appliquée à la réhabilitation fonctionnelle d'un bâtiment commercial, en utilisant l'utilisation existante du scanner laser et des installations existantes, puis exploitée pour obtenir une documentation utile, telle que des pièces dessinées représentant à la fois les opérations de démolition et les nouvelles constructions, dans le cadre d'une méthodologie d'application. Une méthodologie de modélisation des informations du bâtiment (BIM), était appliqué à l'aide d'une numérisation laser et surveillances des installations existantes . Le modèle BIM est ensuite exploité pour obtenir une documentation utile, telle que les pièces dessinées et les plans représentant à la fois les opérations de démolition et des nouvelles construction. Les résultats de cette étude démontre les avantage d'utilisation du scanner laser qui permet de surveiller avec précision les structures et les éléments existants, fournissant des données précises pour la création de modèles BIM, ainsi que des informations détaillées sur la géométrie et les dimensions des objets scannés, garantissant ainsi une représentation précise dans le modèle BIM et permet de collecter des données de manière efficace et rapide, réduisant ainsi le temps et les efforts nécessaires aux mesures manuelles et aux différents relevés . Cette numérisation scanner fournit aussi une documentation complète et détaillée des conditions existantes, qui peut être utilisée pour l'analyse, la planification et la prise de décisions au cours du processus de réhabilitation.

L'étude Zsuzsa Besenyői (2016) [14]. Intitulé: *BIM in panel buildings' rehabilitation*. L'objectif du travail proposé était de mettre en œuvre les avantages fournis par le BIM sur un outil logiciel utilisé comme support à la maintenance des bâtiments, et d'étudier l'interopérabilité entre les logiciels de modélisation BIM et de visualisation, en ce qui concerne la préservation des informations. La méthode utilisé dans cette recherche est celle de la mise en place d'un logiciel d'aide à la maintenance utilisant le BIM. aussi l'étude d'interopérabilité entre les logiciels de modélisation et de visualisation BIM pour avoir enfin comme résultats que le BIM est un outil utile pour la maintenance des bâtiments sans l'absence de problèmes d'interopérabilité existant entre les logiciels BIM.

A. Zita Sampaio et all (2014) [15]. Dans leurs recherche intitulé: *BIM in the Maintenance of Buildings* Les auteurs étudient une méthode d'application du BIM à la restauration générale des bâtiments en se concentrant sur les phases de planification et de conception de ces activités de restauration, et un autre sujet spécialisé est également analysé, à savoir comment mettre en œuvre le BIM, en particulier dans le cas de la réhabilitation de bâtiments en panneaux utilisant les hautes similitudes architecturales de ces structures. La méthode ou les méthodes spécifiques utilisées ne sont pas mentionnées explicitement pour la mise en oeuvre de l'outil logiciel ainsi que l'étude de cas sur l'interopérabilité, dans cette recherche. L'outil logiciel permet aux utilisateurs d'identifier les anomalies dans les composants du bâtiment lors des inspections de maintenance et de les associer aux causes probables, aux méthodes de réparation et à des photographies des anomalies. Les principales résultats tirés de cette recherche sont résumés dans les points qui suivent:

- L'outil logiciel permet aux utilisateurs d'identifier les anomalies dans les composants du bâtiment lors des inspections de maintenance et de les associer aux causes probables, aux méthodes de réparation et à des photographies des anomalies.
- L'application mise en œuvre contient une base de données rigoureuse qui permet à l'utilisateur d'identifier et d'associer directement les anomalies au modèle BIM.
- L'interopérabilité entre les logiciels de modélisation BIM et de visualisation, en particulier dans le format standard Industry Foundation Classes (IFC), a également été étudiée comme étude de cas.

Cette recherche met en lumière les défis et les problèmes liés à l'interopérabilité entre les différents logiciels BIM.

L'étude de Laura Puigdelloses Vallcorba 2018 [16] intitulé : *Analysis of the advantages of BIM in construction rehabilitation* . L'étude se concentre sur l'application du BIM à la restauration générale des bâtiments et à la réhabilitation des bâtiments en panneaux. Elle traite des avantages de l'utilisation du BIM (Building Information Modeling) dans la réhabilitation des constructions. Six cas pratiques de réhabilitation ont été étudiés pour démontrer les avantages du BIM. Mettant l'accent sur les avantages du BIM en terme de détection des erreurs, de réduire les coûts des matériaux et main d'œuvre aussi l'amélioration de la communication entre les différents agents impliqués dans un même projet en utilisant le programme Revit pour présenter l'application pratique du BIM dans le projet. Dans les résultats de cette recherche, le BIM est décrit comme un outil qui peut fournir des données

plus précises et quantifiables sur un bâtiment, ce qui permet d'éviter les imprévus et d'améliorer la gestion de projet. Aussi l'auteur souligne que le BIM peut contribuer à réduire les incertitudes, à accroître la fiabilité et à améliorer la conformité aux objectifs du projet en termes de temps, de coût et de qualité, ainsi qu'il mentionne également que la méthodologie traditionnelle entraîne souvent des coûts de projet plus élevés en raison du manque de prise en compte de toutes les informations nécessaires, alors que le BIM donne la priorité aux informations et peut aider à mieux gérer les processus de conception et de construction.

L'étude de Alcínia Zita Sampaio (2015) [17] intitulé : *Building Information Modelling Concept Applied in Maintenance of Buildings*. Le travail proposé consistait à mettre en œuvre les avantages fournis par le BIM sur un outil logiciel utilisé comme support à la maintenance des bâtiments, et à étudier l'interopérabilité entre les logiciels de modélisation BIM et de visualisation, en ce qui concerne la préservation des informations. Les travaux proposés ont mis en œuvre un outil logiciel doté d'une base de données rigoureuse permettant aux utilisateurs d'identifier les anomalies dans les composants du bâtiment lors des inspections de maintenance et de les associer aux causes probables, aux méthodes de réparation et aux photographies des anomalies téléchargées sur le site. Les données d'inspection ont été stockées dans le modèle BIM (Building Information Model), ce qui permet de les consulter lors de la planification de la maintenance. Dans les résultats de cette recherche les auteurs ont mentionnés que :

- La mise en œuvre de l'outil logiciel utilisant des modèles d'information du bâtiment (BIM) à des fins de maintenance des bâtiments a démontré les avantages de l'utilisation du BIM dans ce contexte, notamment des gains de productivité et une diminution de la probabilité d'erreur.
- L'outil logiciel a permis aux utilisateurs d'identifier les anomalies dans les composants du bâtiment lors des inspections de maintenance et de les associer aux causes probables, aux méthodes de réparation et aux photographies des anomalies téléchargées sur le site.
- Les données d'inspection ont été stockées dans le modèle BIM, ce qui le rend consultable lors de la planification de la maintenance.

Aussi la recherche a également mis en évidence les problèmes d'interopérabilité entre les logiciels BIM et les avantages de l'utilisation du BIM pour la maintenance des bâtiments, tout en reconnaissant que des problèmes d'interopérabilité persistent.

L'étude de Ardhiana Muhsin Machdi (2020) [18] intitulé: *Building Information Modeling Concept And Its Application in Building Renovation Stage In Term Of Time Efficiency*. Cette recherche est structurée et se concentre davantage sur la question du gain de temps, qui est très importante lors de la phase de rénovation et sous la forme d'une comparaison entre les méthodes conventionnelles et les méthodes appliquant le concept BIM. Les méthodes utilisées pour la réalisation de cette recherche sont regroupé dans les points suivants :

- Étude et collecte d'informations à partir de deux cas de rénovation, en mettant l'accent sur la méthode de présentation des dessins de bâtiments à des fins de rénovation.
- Entretien avec des membres de NFN Studio pour recueillir des informations sur la gestion des cas de rénovation.
- Collecte d'informations par le biais d'un questionnaire BIM auprès de 30 étudiants en architecture, en particulier sur le BIM et la rénovation.
- Analyse et comparaison de chaque étape de chaque flux de travail.

Les résultats les plus marquants obtenus par cette étude sont : considéré le BIM comme une technologie révolutionnaire qui à changé la perspective de la conception, de la mise en oeuvre et de l'exploitation des bâtiments. Et que le BIM offre la possibilité de modéliser des informations virtuelles dans un seul modèle, en fournissant la visualisation, la détection des collisions, les phases de construction et les matériaux pour l'équipe de conception, les entrepreneurs, les sous-traitants et les propriétaires.

L'étude de Angelo Luigi Camillo Ciribini (2015) [19]. Intitulé: *BIM methodology as an integrated approach to heritage conservation management*. Dans cette étude les auteurs ont déduit que l'application de flux de travail BIM aux projets de restauration et de rénovation a permis d'évaluer le potentiel de ces technologies à différentes étapes du processus : étude, phase de conception, suivi de l'avancement des travaux et évaluation des amendements et modifications proposés. En utilisant comme méthodes : la mise en œuvre de modèles BIM dans deux études de cas et la Collaboration entre les différentes parties prenantes impliquées dans le processus de conservation ainsi que la numérisation laser terrestre pour étudier avec précision les études de cas. Une bibliothèque BIM personnalisée a été produite avec succès pour les futures études de cas. Les résultats de travail des ces chercheurs confirment la

méthodologie BIM utilisée pour la conservation planifiée et la gestion des bâtiments patrimoniaux.

L'étude de Peter Mésároš (2020) [20]. Intitulé : *Adaptive Design of Formworks for Building Renovation Considering the Sustainability of Construction in Bim Environment – Case Study*. Cet article étudie l'utilisation de l'environnement de modélisation des informations du bâtiment (BIM) pour la conception de coffrages adaptatifs dans le cadre de la rénovation de bâtiments à Kosice, en Slovaquie, en mettant l'accent sur la durabilité. La méthodologie de recherche employée dans cet article est une approche d'étude de cas, qui implique une analyse qualitative de la question particulière de la conception de coffrages adaptatifs dans le cadre de la rénovation de bâtiments. L'étude de cas se concentre sur l'utilisation de l'environnement de modélisation des informations du bâtiment (BIM) pour la conception adaptative des éléments de coffrage. Il explore les capacités de l'environnement BIM à adapter la conception des coffrages à l'évolution des conditions d'éclairage, de ventilation, de chauffage et de température pendant le processus de conception du bâtiment.

L'article propose aussi un processus en quatre étapes pour démontrer les possibilités de conception adaptative de coffrages à l'aide du BIM. Cependant, les détails spécifiques de ces étapes ne sont pas fournis dans les sources disponibles. Les résultats de cette recherche démontrent l'utilisation de l'environnement BIM pour la conception de coffrages adaptatifs dans le cadre de la rénovation de bâtiments.

L'étude de Danilo Di Mascio (2013) [21]. Intitulé : *Building Information Modelling BIM-Supported Cooperative Design in Sustainable Renovation Projects*. L'article traite des avantages et des limites de l'utilisation de la technologie de modélisation des informations du bâtiment (BIM) dans les projets de rénovation durable, en soulignant l'importance de préserver l'environnement bâti et d'améliorer la qualité de vie des habitants.

Il met en évidence la manière dont le BIM peut améliorer la conception, l'organisation et la construction des projets de rénovation, notamment en ce qui concerne la gestion des contraintes des bâtiments existants. En ce qui concerne les méthodes utilisées, l'article ne mentionne pas explicitement les méthodes spécifiques utilisées dans la recherche. Il aborde toutefois les avantages et les limites de l'utilisation de la technologie de modélisation des informations du bâtiment (BIM) dans les projets de rénovation durable, en soulignant les différences entre la conception de nouveaux bâtiments et la rénovation de bâtiments existants.

Cette recherche a donné comme résultats:

- les principaux avantages de l'utilisation de la technologie de modélisation des informations du bâtiment (BIM) dans les projets de rénovation durable, notamment l'amélioration des processus de conception, d'organisation et de construction.
- Le BIM soutient la conception coopérative dans les projets de rénovation, en contribuant aux trois dimensions de la durabilité : environnementale, économique et sociale.
- La conservation adéquate de l'environnement bâti grâce à une rénovation durable permet de préserver de précieuses ressources matérielles et culturelles pour les générations futures.

L'étude de Saverio D'Auria (2014) [22]. Intitulé : *Parametric planning for the restoration and rehabilitation of architectural heritage*. Dans cet article, une étude a été réalisée pour comparer les coûts-avantages d'une enquête standard et d'une enquête BIM lors de l'arpentage d'un bâtiment historique, et les résultats ont montré que l'efficacité et les avantages de ce type d'approche pour l'analyse, la gestion et la planification de projets de réhabilitation se sont révélés significatifs. La méthode utilisée dans cette recherche est basée sur une revue de la littérature et une analyse des connaissances et pratiques existantes liées à l'utilisation de la technologie de modélisation des informations du bâtiment (BIM) dans les projets de rénovation durable. Pour cela les auteurs ont probablement examiné des études, des rapports et des études de cas pertinents afin de recueillir des informations sur les avantages et les limites du BIM dans la rénovation durable. Les résultats de cette étude sont notés dans les points suivants.

- La technologie de modélisation des informations du bâtiment (BIM) offre des avantages significatifs dans les projets de rénovation durable, en améliorant les processus de conception, d'organisation et de construction.
- Le BIM soutient la conception coopérative, en contribuant aux trois dimensions de la durabilité : environnementale, économique et sociale.
- La conservation adéquate de l'environnement bâti grâce à une rénovation durable est cruciale pour préserver les précieuses ressources matérielles et culturelles pour les générations futures.

L'étude de Martin Mattsson (2013) [23]. Intitulé : *BIM in Infrastructure : Using BIM to increase efficiency through the elimination of wasteful activities*. Dans cette recherche, une

étude de cas d'un projet de pont a été réalisée afin d'étudier comment le BIM peut être utilisé pour soutenir un processus de planification et de conception collaboratif détaillé, qui à son tour crée les conditions préalables à un processus de production plus efficace grâce à l'élimination des activités sans valeur ajoutée. Les applications BIM ont été utilisées tout au long de la chaîne de projet. Les auteurs de cet article ont utilisé une méthode afin de réaliser cette recherche basé sur une revue de la littérature, des études de cas ont été faites à partir d'un projet de pont, fournissant un aperçu des processus de planification, de conception et de construction. En plus des entretiens menés avec des personnes impliquées dans le projet et des professionnels expérimentés du secteur, ce qui a permis d'étudier l'utilisation du BIM tout au long de la chaîne du projet, de la conception à la production. Cette étude s'est conclue par les résultats suivants:

- L'étude a identifié diverses activités sans valeur ajoutée dans le secteur de la construction et les obstacles à la mise en œuvre du BIM dans les projets d'infrastructure.
- La mise en œuvre du BIM s'est révélée présenter plusieurs avantages susceptibles d'améliorer l'efficacité des projets d'infrastructure.
- Il a été constaté que les applications BIM permettaient un processus collaboratif détaillé de planification et de conception, qui à son tour crée les conditions nécessaires à un processus de production plus efficace grâce à l'élimination des activités sans valeur ajoutée.

II.4. Etudes traitant la productivité et l'optimisation de réhabilitation en BIM :

L'étude de Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa et all (2023) [24]. Intitulé : *BIM Interoperability in the Maintenance Planning Process for Existing Buildings*. Dans cet article les auteurs abordent les défis liés à la maintenance et à la gestion des bâtiments existants en raison de l'absence de plans et de documents de projet, ainsi que de l'absence de registres des modifications apportées au fil du temps, ce qui rend difficile l'analyse et le traitement des problèmes potentiels susceptibles d'affecter la durée de vie du bâtiment. Pour cela les auteurs proposent méthodologie de flux de travail qui combine les concepts de gestion des installations et l'interopérabilité BIM à l'aide de l'IFC (Industry Foundation Classes) et de formulaires en ligne pour la collecte de données et la documentation des inspections visuelles.

La méthodologie est démontrée à l'aide de l'exemple du bâtiment SG-12 de l'université de Brasilia, qui est un ancien bâtiment en cours de modification et dont l'inscription sur la liste du patrimoine culturel est envisagée. Cette méthodologie vise à améliorer la rapidité, la précision et la disponibilité des informations essentielles pour le processus de planification de la maintenance des bâtiments existants par l'utilisation de formulaires en ligne pour la collecte de données et la documentation des inspections visuelles, qui sont ensuite stockées dans des feuilles de calcul basées sur le cloud.

Les données collectées sont utilisées pour créer un modèle 3D du bâtiment, codé par couleur en fonction de la priorité d'intervention, ce qui permet de mieux planifier la maintenance et le traitement des pathologies, ensuite il est visualisé et analysé à l'aide d'un logiciel tel que Navisworks Manage.

L'étude de Zhen-Song Chen (2022) [25]. Intitulé : *BIM-aided large-scale group decision support: Optimization of the retrofit strategy for existing buildings.*

Selon les auteurs, Wang et al. ont proposé un cadre d'aide à la décision pour la rénovation qui intègre la modélisation des informations du bâtiment (BIM) à la prise de décision de groupe à grande échelle, qui constitue une nouvelle application de la technologie numérique à la rénovation de bâtiments existants. Dans la méthode utilisée dans cette recherche, le BIM fournit des données géométriques et non géométriques massives pour le processus décisionnel de groupe multicritères à grande échelle. La méthode du meilleur et du pire groupe est utilisée pour déterminer les pondérations des critères. Les parties prenantes évaluent d'autres stratégies de rénovation en fonction des préférences linguistiques de distribution. aussi Un modèle d'optimisation axé sur la cohérence est utilisé pour personnaliser les échelles d'évaluation numériques des parties prenantes. Les principales résultats de cet article sont fixes dans les points suivants:

- Le classement des stratégies alternatives est obtenu grâce au clustering k-means, au processus de recherche de consensus et à des données objectives issues du BIM.
- Le cadre d'aide à la décision proposé est appliqué à la rénovation de la communauté de Suifeng Garden en Chine, démontrant ainsi sa rationalité et sa supériorité.

L'étude de Erik A. Poirier. (2015) [26]. Intitulé : *Measuring the impact of BIM on labor productivity in a small specialty contracting enterprise through action-research.* Dans cet article, les auteurs présentent les résultats d'un projet de recherche-action entrepris avec un

petit entrepreneur en mécanique qui étudie l'impact du BIM sur la productivité du travail dans un grand projet commercial. L'article a utilisé une approche de recherche-action pour évaluer l'impact de la mise en œuvre du BIM sur la productivité du travail dans une petite entreprise de sous-traitance spécialisée. L'équipe de recherche a mené une étude de cas longitudinale de deux ans, observant et documentant le processus d'adoption et de mise en œuvre du BIM par l'organisation. Egalement l'équipe a effectué une phase de diagnostic pour étudier et examiner les pratiques actuelles de l'organisation en matière d'utilisation du BIM et d'évaluation des performances. Sur la base du diagnostic, l'équipe de recherche a formulé des questions de recherche axées sur l'impact du BIM sur la productivité du travail et a développé une stratégie d'évaluation des performances. Les points de collecte des données, les mécanismes et les variables du projet ont été identifiés, et un plan a été élaboré pour la collecte et l'analyse des données. L'équipe de recherche avait un assistant de recherche sur place tous les jours pour suivre les données de productivité du travail, et elle a analysé les données collectées aussi les auteurs de cette recherche ont utilisés diverses approches pour mesurer et évaluer la productivité du travail ont été envisagées, notamment l'évaluation sur le terrain, l'échantillonnage du travail et les modèles factoriels, mais dans l'ensemble, l'article a utilisé une combinaison d'études de cas longitudinales, de diagnostic, de collecte de données et de méthodes d'analyse pour évaluer l'impact du BIM sur la productivité du travail dans l'entreprise de sous-traitance spécialisée. Pour en fin réaliser les résultats qui suit:

- L'étude a révélé un impact positif évident du BIM sur la productivité du travail dans une petite entreprise de sous-traitance spécialisée.
- Les zones modélisées et préfabriquées ont enregistré des gains de productivité allant de 75 % à 240 % par rapport aux zones non modélisées.
- L'organisation a enregistré des gains considérables en termes de productivité du travail dans les domaines où le BIM et la préfabrication étaient utilisés, malgré les réalités difficiles du projet.
- L'article souligne l'importance de mesurer et de quantifier l'impact du BIM sur la productivité du travail, car il peut influencer directement les offres d'emploi d'une organisation .
- L'équipe de recherche a étudié les pratiques actuelles de l'organisation en matière d'utilisation du BIM et d'évaluation des performances, fournissant des données qualitatives sur l'évolution et l'impact du BIM sur le projet étudié.

L'étude de Junbok Lee. (2017) [27]. Intitulé : *BIM-assisted labor productivity measurement method for structural formwork*. Dans cet article, une méthode d'acquisition de données sur la productivité du travail sur le terrain intégrant un modèle 3D avec des informations associées est proposée pour évaluer la méthode proposée, un projet de cas et des données de terrain ont été utilisés pour évaluer la productivité. L'article développe une méthode d'acquisition de données sur la productivité du travail sur le terrain en intégrant un modèle 3D avec les informations associées. Cette méthode vise à mesurer la progression des composés et implique l'utilisation d'applications de modélisation des informations du bâtiment (BIM) en 3D. Et la méthode proposée a été évaluée à l'aide d'un projet de cas et de données de terrain pour évaluer la productivité. Les résultats de la recherche sont discutés en termes de résultats significatifs et de développements futurs potentiels.

L'étude de Fabrizio D'Amico (2022) [28]. Intitulé : *BIM for infrastructure: an efficient process to achieve 4D and 5D digital dimensions*. Les auteurs de cette recherche ont travaillé sur un modèle dynamique impliquant une approche orientée vers l'optimisation à la fois pour l'étude des quantités et la définition du calendrier de gestion de la conception est présenté, qui constituent deux des problèmes majeurs concernant les critères d'évaluation d'un projet de génie civil. Comme méthode utilisée, cet article propose une méthodologie pour mettre en œuvre un modèle dynamique d'optimisation du temps (4D) et des coûts (5D) dans les projets de génie civil, en s'appuyant sur des outils de création et des logiciels de modélisation 4D/5D pour intégrer les données du projet dans un environnement partagé. L'article mentionne aussi l'utilisation de l'approche de modélisation des informations du bâtiment (BIM) et l'intégration des informations sur les délais et les coûts dans un système synergique pour soutenir le processus de conception. Le logiciel STR Vision CPM est mentionné par les auteurs de cette recherche, comme un outil permettant de visualiser et de lire des données et des quantités à partir du modèle BIM, fournissant un levé exact qui fait directement référence aux quantités du modèle d'information de l'infrastructure. La méthodologie présentée dans l'article vise à fournir un processus efficace pour atteindre les dimensions numériques 4D et 5D dans les projets d'infrastructure en soulignant l'importance de la métrologie et du calendrier de gestion de la conception dans les projets de génie civil, en mentionnant leur rôle en tant que critères d'évaluation majeurs.

L'étude de Tushar Nath (2015) [29]. Intitulé : *Productivity improvement of precast shop drawings generation through BIM-based process re-engineering*. Dans cet article, les auteurs

identifient les contraintes du flux de travail actuel pour la génération de dessins préfabriqués en atelier et proposent un flux de travail technologiquement. L'article vise à identifier les contraintes du flux de travail actuel pour la génération de dessins préfabriqués en atelier et à proposer un flux de travail basé sur le BIM pour répondre à ces contraintes, entraînant une amélioration globale significative de la productivité. La recherche a adopté une approche de recherche quantitative, comprenant une enquête en ligne et des entretiens techniques approfondis, afin de déterminer l'impact du BIM sur la productivité des entreprises de préfabrication travaillant sur des projets HDB (Housing and Development Board: Il s'agit d'une agence du secteur public de Singapour qui joue un rôle crucial dans le secteur du logement et de la construction du pays. La Building and Construction Authority (BCA) de Singapour s'est fixé un objectif d'amélioration de la productivité pour l'année 2020, et HDB prend l'initiative d'adopter la modélisation des informations du bâtiment (BIM) comme outil technologique clé pour atteindre cet objectif). Comme résultats de cette recherche on peut citer les points suivants: □ La recherche a identifié les contraintes du flux de travail actuel pour la génération de dessins préfabriqués en atelier et a proposé un flux de travail technologiquement amélioré basé sur le BIM pour répondre à ces contraintes.

- Une cartographie de la chaîne de valeur (VSM) et une analyse de la chaîne de valeur (VSA) ont été réalisées pour analyser le flux de travail actuel pour la génération de dessins d'atelier de préfabrication, fournissant des estimations du temps de valeur ajoutée et du temps d'attente.
- Le futur flux de travail proposé, mis en œuvre grâce à l'utilisation de composants BIM paramétriques et à des principes de construction allégée, a entraîné une amélioration globale significative de la productivité en termes de temps de traitement et de temps total de génération de dessins d'atelier préfabriqués.
- La recherche a mis en évidence les avantages potentiels en termes de productivité liés à l'utilisation d'outils BIM dans le futur flux de travail proposé.
- Le passage d'un flux de travail actuel chronophage à un flux de travail technologiquement amélioré basé sur le BIM devait permettre de réduire les activités fastidieuses et d'améliorer la productivité pour la génération et l'approbation des dessins d'atelier.

L'étude de Chang-Hoon Choi (2014) [30]. *Intitulé : Productivity Analysis for Structural Formwork Using 3D BIM*. Dans cet article, un modèle intégré d'un BIM 3D avec un rapport

quotidien du contremaître est développé pour mesurer et analyser la productivité en termes de bâtiment individuel et d'équipe de travail. Il se concentre sur l'analyse de la productivité des coffrages structuraux à l'aide d'une approche 3D BIM. Le contrôle de l'avancement de la construction est crucial en raison de divers facteurs imprévus qui influent sur les retards dans les délais et les dépassements de coûts. La productivité est mesurée par les coûts et est exprimée comme une valeur constante sur place divisée par des entrées telles que les heures travaillées. Pour atteindre l'objectif de recherche, un modèle intégré d'un BIM avec un rapport quotidien du contremaître est développé, dans lequel les quantités extraites d'un modèle 3D et les informations sont intégrées à la main-d'œuvre utilisée. Le modèle développé est appliqué à un projet de cas pour mesurer et analyser la productivité en termes de bâtiment individuel et d'équipe de travail.

La méthode utilisée par les auteurs de cette recherche, est celle d'intégration d'un modèle BIM 3D avec un rapport quotidien du contremaître pour analyser la productivité du coffrage structurel. Pour extraire enfin de ce modèle BIM 3D, les quantités et les informations intégrées à la main d'œuvre utilisée pour mesurer et analyser la productivité.

Les résultats de Le document a identifié l'importance du contrôle de l'avancement de la construction et la nécessité de considérer la productivité comme une mesure de la rentabilité.

L'étude de Hafez Zainudinet (2016) [31]. *Intitulé : Utilization of building information modeling (BIM) in planning an adaptive reuse project of a Traditional Malay House (TMH).*

L'article explore l'utilisation de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) pour analyser les performances de construction et environnementales d'une maison malaise traditionnelle (TMH) dans le cadre d'un projet de réutilisation adaptative en Malaisie. L'objectif est de maximiser les performances du bâtiment TMH une fois celui-ci reconstruit sur un nouvel emplacement. Le BIM est un processus qui utilise un logiciel de modélisation tridimensionnelle des bâtiments pour améliorer l'efficacité de la conception et de la construction des bâtiments. L'étude utilise le Green Building Index (GBI) de Malaisie et les directives LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) pour évaluer la conception et les performances du TMH. L'étude se concentre sur l'orientation des bâtiments et la performance en matière de lumière naturelle. Les résultats de la simulation BIM sont utilisés pour recommander des améliorations des performances du TMH sans compromettre son originalité et ses valeurs patrimoniales. L'étude promeut également la pratique de la

réutilisation adaptative à des fins patrimoniales et de conservation à l'aide du BIM et de ses outils de simulation.

L'étude de S. Bruno (2018) [32]. *Intitulé : Historic Building Information Modelling: performance assessment for diagnosis-aided information modelling and management.*

La modélisation des informations du bâtiment combinée à des systèmes d'automatisation peut améliorer le contrôle qualité et les économies de main-d'œuvre lors du processus de rénovation des bâtiments historiques. L'article traite des aspects méthodologiques de la création de modèles paramétriques « tels que construits » de bâtiments historiques, en mettant l'accent sur le diagnostic et l'évaluation des performances. Il passe en revue la littérature existante sur les modèles HBIM, le diagnostic et l'évaluation des performances, et identifie les lacunes dans les connaissances. L'article propose une nouvelle méthodologie appelée Modélisation et gestion des informations sur les bâtiments historiques assistées par diagnostic (DA-HBIMM) comme cadre pour l'acquisition intelligente de connaissances et la notification des performances et des risques évalués à l'aide de l'automatisation cognitive et de l'intelligence artificielle à l'avenir.

L'article propose une nouvelle méthodologie appelée Modélisation et gestion des informations sur les bâtiments historiques assistées par diagnostic (DA-HBIMM) comme cadre pour l'acquisition, la collecte et la notification intelligentes des performances et des risques évalués à l'aide de l'automatisation cognitive et de l'intelligence artificielle.

Les résultats de l'article suggèrent que la combinaison du BIM avec des systèmes d'automatisation peut améliorer le contrôle qualité et les économies de main-d'œuvre lors du processus de rénovation des bâtiments historiques. L'article met également en évidence le potentiel du BIM pour résoudre les problèmes critiques en matière de documentation et de préservation des actifs existants, en particulier lors d'interventions rapides dans des conditions dangereuses.

L'étude de Daniel Heigermoser (2019) [33]. *Intitulé : BIM-based Last Planner System tool for improving construction project management.*

L'article propose un outil de gestion de la construction qui combine le Last Planner System (LPS) avec la visualisation 3D des projets de construction afin d'améliorer la productivité et de réduire les déchets dans le secteur de la construction.

L'outil proposé permet de diviser les projets de construction en zones de travail, d'automatiser le calcul des quantités et propose une simulation de construction 4D à code

couleur pour une planification à court terme à l'aide du LPS. Il permet aussi une évaluation et une analyse systématiques de la planification de la construction en termes de productivité, d'allocation de main-d'œuvre et de quantification des déchets, favorisant ainsi une amélioration continue de la planification de la construction future.

Les résultats de cet article sont mentionnés suivant les points suivants:

- L'outil de gestion de la construction proposé, qui combine le système Last Planner (LPS) avec la visualisation 3D des projets de construction, vise à améliorer la productivité et à réduire les déchets dans le secteur de la construction.
- L'outil permet de diviser les projets de construction en zones de travail, d'automatiser le calcul des quantités et propose une simulation de construction 4D à code couleur pour une planification à court terme à l'aide du LPS.
- L'outil prototype a été développé et testé pour évaluer son efficacité à améliorer la gestion des projets de construction.
- L'outil permet une évaluation et une analyse systématiques de la planification de la construction en termes de productivité, d'allocation de main-d'œuvre et de quantification des déchets, favorisant ainsi une amélioration continue de la planification de la construction future.
- En capitalisant sur les synergies entre Lean Construction et BIM, l'outil propose une approche systématique pour améliorer la gestion des projets de construction et obtenir de meilleurs résultats en termes de productivité et de réduction des déchets.

L'étude de Douglas E. Chelso (2010) [34]. *Intitulé : The effects of building information modeling on construction site productivity.*

Dans cet article, les auteurs montrent que les facteurs les plus déterminants de la réussite des projets de modélisation des informations du bâtiment (BIM) en termes de productivité du site sont les facteurs humains plutôt que techniques. L'article ne mentionne pas explicitement les méthodes spécifiques utilisées dans la recherche. Il se concentre principalement sur les effets de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) sur la productivité des chantiers de construction et présente des études de cas pour étayer ses conclusions.

Les principales résultats tirés de ce travail de recherche sont:

- La mise en œuvre de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) dans les projets de construction a permis de réaliser des gains de productivité allant de 5 à 40 %, selon la manière dont le processus est géré.
- Les projets utilisant le BIM ont permis de réduire les reprises et les temps d'inactivité pour les ouvriers, ce qui a permis aux entrepreneurs spécialisés de réaliser des économies d'environ 9 % sur les coûts des projets.
- Les principaux indicateurs de l'augmentation de la productivité dans les projets BIM incluent une réduction significative des demandes d'informations (RFI), une meilleure conformité des calendriers et une diminution des ordres de modification dus à des conflits de plans.
- Le processus de détection des conflits, rendu possible par le BIM, a été identifié comme le facteur le plus important pour éliminer les conflits sur le terrain et contribuer à la réduction des coûts.
- L'effet global de la mise en œuvre du BIM est une économie nette pour le maître d'ouvrage, allant de quelques pour cent pour les projets soumis à un appel d'offres à plus de 10 % pour les projets intégrés.

II.5. Etudes de revue littérature du BIM

L'étude de Nhat Nam Bui et all (2016) [35]. *A Review of Building Information Modelling for Construction in Developing Countries*. Dans cette étude les auteurs présentent une revue des recherches existantes sur la mise en œuvre du BIM dans les pays en développement et mettent en évidence les lacunes et les solutions pour la mise en œuvre du BIM, en particulier dans les économies à revenu faible et intermédiaire. Il aborde le potentiel du BIM pour améliorer l'efficacité des projets, la collaboration et la prise de décision, tout en levant les obstacles à sa mise en œuvre dans les pays en développement. Dans l'ensemble, l'article de ces chercheurs donne un aperçu de l'état actuel de la mise en œuvre du BIM dans les pays en développement et met en lumière les opportunités et les défis associés à son adoption dans le secteur de la construction.

L'étude de Rebekka Volk et all (2014) [36]. *Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs*. L'article présente une revue de la littérature sur l'utilisation de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) pour les

bâtiments existants, en mettant en évidence ses avantages et ses défis. Il identifie également les futurs besoins de recherche en termes de mise en œuvre du BIM, d'intégration des données et d'interopérabilité. Les résultats montrent que la mise en œuvre du BIM dans les bâtiments existants est encore limitée, en raison des défis liés (1) à l'effort élevé de modélisation/conversion des données de construction capturées en objets BIM sémantiques, (2) à la mise à jour des informations dans le BIM et (3) à la gestion de données, d'objets et de relations incertains dans BIM survenant dans des bâtiments existants. Ces résultats sont obtenus après la revue de 180 publications récentes et Analyse des défis liés à la mise en œuvre du BIM pour les bâtiments existants.

L'étude de Deniz Artan Ilter et al (2015) [37]. *BIM for building refurbishment and maintenance: current status and research directions*. Dans cet article, les auteurs présentent un aperçu stratégique de la littérature actuelle sur la modélisation des informations du bâtiment (BIM) pour la rénovation et la maintenance des bâtiments afin de mettre en évidence les facteurs expliquant le sous-développement relatif du domaine et de contribuer au développement d'une base de connaissances plus cumulative en présentant l'état actuel et en suggérant des orientations futures pour la recherche. Les auteurs ont utilisé comme méthode la revue systématique de la littérature et l'analyse qualitative et quantitative pour l'interprétation des études existantes. Les résultats de ce travail de recherche sont :

- L'utilisation du BIM (Building Information Modeling) pour l'arpentage des bâtiments historiques a permis de gagner beaucoup de temps par rapport aux méthodes d'enquête traditionnelles, avec un ratio d'économie par jour de travail de 95.
- Le processus d'arpentage BIM a produit un modèle 3D qui a permis une analyse plus rapide par rapport au nombre limité de graphiques 2D produits par les méthodes traditionnelles.
- L'application des méthodes BIM au patrimoine architectural et aux bâtiments préexistants a montré des avantages à la fois pour la construction de nouveaux bâtiments et pour la réhabilitation de bâtiments existants.

L'étude de Aryani Ahmad Latiffi et al (2017) [38]. *Building information modelling (BIM) after ten years: Malaysian construction players' perception of BIM*. L'article explore la compréhension du concept de modélisation des informations du bâtiment (BIM) par les acteurs de la construction de l'industrie de la construction Malaisienne.

Une revue de littérature et collecte de données provenant de différents source concrétise la méthode utilisée dans cette recherche pour avoir

II.6. Conclusion:

La transformation du secteur de l'architecture, de l'ingénierie, de la construction et de la gestion des installations (AECO/FM) est fortement influencée par l'émergence de technologies avancées, telles que la modélisation des informations du bâtiment (BIM). Cette méthode technologique innovante permet un contrôle amélioré et une interopérabilité sans précédent à toutes les phases des projets de construction, en comblant les lacunes en matière de communication et de collaboration entre les parties prenantes de l'industrie et en consolidant le rôle indispensable du BIM en matière d'intégration, d'automatisation et d'efficacité opérationnelle.

L'importance du BIM est de plus en plus évidente dans les milieux universitaires, de nombreuses publications de recherche étudiant ses applications et avantages potentiels. Néanmoins, un examen détaillé indique que si son utilisation pour la restauration et la mise en valeur des structures existantes est en hausse, la documentation dans ce domaine est à la traîne par rapport à celle des nouvelles constructions. L'analyse des travaux universitaires montre des avancées notables, mais des recherches plus approfondies sont essentielles pour exploiter pleinement les capacités du BIM dans les projets de rénovation.

Par conséquent, pour améliorer la compréhension et la mise en œuvre du BIM dans les projets de réhabilitation et de rénovation, il est impératif d'explorer et d'évaluer en permanence les données existantes, tout en tenant compte des caractéristiques et des exigences distinctes des bâtiments debout. Cette approche méthodologique favorisera la progression de méthodologies pionnières et l'amélioration perpétuelle des procédures dans le domaine de la construction.

Chapitre III
Enjeux et Positionnement:
BIM en Réhabilitation

III.1.Introduction

Les outils numérique qui accompagnent les nouvelles technologies ont touché et transformer chaque aspect de notre vie quotidienne et professionnelle : les achats, la communication, la scolarisation ,...etc. Ce changement du paradigme technologique est en train de rebattre les cartes d'un secteur traditionnel, l'obligeant à revoir ses méthodes, ses outils et ses pratiques traditionnels habituelles. le secteur de bâtiment notamment n'a pas échapper de se changement, un nouveau paradigme s'est apparu et déclencher par le building information modeling (BIM), traduit par ce qu'on appelle la maquette numérique, qui est basé sur d'idée d'utilisation continue d'un modèle numérique de la construction tous le long de son cycle de vie et qui est présenté généralement comme fédératrice des interventions de tous les acteurs du bâtiment, travaillant ensemble au profit d'une même construction, chacun avec ces compétences et apports .

III.2.Le BIM

III.2.1.Introduction

Depuis l'apparition des ordinateurs l'informatique ont touché tous les domaines professionnels, la construction, l'architecture, le génie civil et l'ingénierie ont beaucoup profité de cette technologie. Au début l'idée était pour gagner du temps et faire des économies budgétaires par la création de modèles numériques des projets de construction mais avec l'introduction des informations dans ces modèles numériques pourraient entrainer des gains, dans l'ensemble des étapes de cycle des bâtiment, comme les opérations de maintenances, de réhabilitations et la gestion des activités le long du cycle de vie de la construction.

l'information dans le modèle numérique est considérée comme une des sources stratégiques,

pour la construction de la maquette numérique (MN) du projet et la prise de décision du gestionnaire de cette maquette. L'échange et l'acquisition d'information deviennent un enjeu essentiel de la réussite de tout projet de construction ou même de réhabilitation de manière générale.

BIM est l'acronyme qui signifie building information modling traduit en langue française par ce qu'on appel la maquette numérique, qui déjà fait ses épreuves dans autre domaine que

le bâtiment, comme dans l'aéronautique et le secteur d'automobile. Avec ses capacités de structuration et de compréhension des informations techniques complexes bien aussi avec ses capacités d'anticipation grâce aux visualisations et simulations numérique, le BIM est devenue la solution la plus efficace et de productivité de travail dans le secteur de bâtiment. Et dans ce chapitre nous allons clarifier et enlever l'ambiguïté sur l'acronyme BIM.

III.2.2. Définition du BIM et MN:

Le BIM de chaque projet de construction est unique, si bien qu'il est difficile de le cerner et l'englobé dans une seule et unique définition. Plusieurs définitions de BIM existent , pouvant être synthétisées de la manière suivante: le BIM signifie Building Information Model, Modeling ou Management. Il désigne un dispositif de gestion des informations relatives à la conception, à la réalisation et à l'exploitation du bâtiment du point de vue de leur modélisation (model, désignant une représentation numérisée de l'ensemble des éléments constituant le projet de construction), de leur processus (modeling , comme démarche et travail de modélisation impliquant plusieurs acteurs) et de leur management [39].

Le modèle d'information sur le bâtiment (construction) (BIM) est défini par normes en tant que « représentation numérique partagée de caractéristiques fonctionnelles de tout objet bâti qui forme un ensemble fiable base des décisions » [40]. Les BIM proviennent de modèles de produits [17], [18] qui sont largement appliqués dans la pétrochimie, l'automobile ou la construction navale industrie [19][20]. Le BIM représente des bâtiments réels pratiquement sur toute la l'ensemble du LC en tant que modèles de construction numériques sémantiquement enrichis et cohérents[19][21][22]. Le BIM est réalisé avec un logiciel orienté objet et consiste en des objets paramétriques représentant des composants de construction[23],[47],[24]. Objets peut avoir des attributs géométriques ou non géométriques avec des fonctions, informations sémantiques ou topologiques [47],[49]. Par exemple, les attributs fonctionnels peuvent être des durées ou des coûts d'installation, des informations sémantiques stocker par ex. informations de connectivité, d'agrégation, de confinement ou d'intersection et les attributs topologiques fournissent par exemple les informations sur les objets » emplacements, contiguïté, coplanarité ou perpendicularité

Le BIM peut être vu d'un point de vue étroit et d'un point de vue plus large (Fig.III. 1). Le BIM au sens étroit (« petit bim » [25], « outil » [28]) comprend uniquement la maquette numérique du bâtiment lui-même au sens d'un hub ou référentiel central de gestion de l'information [30],[26],[27] et ses problèmes de création de modèles (problèmes techniques) [25]. Les plates-formes BIM commerciales offrent une gestion intégrée des données, des bibliothèques de composants et des fonctionnalités générales [7]. Les différenciations répandues du BIM sont le BIM 3D (modèle spatial avec métré), 4D (plus calendrier de construction) et 5D (plus calcul des coûts) [24,28].

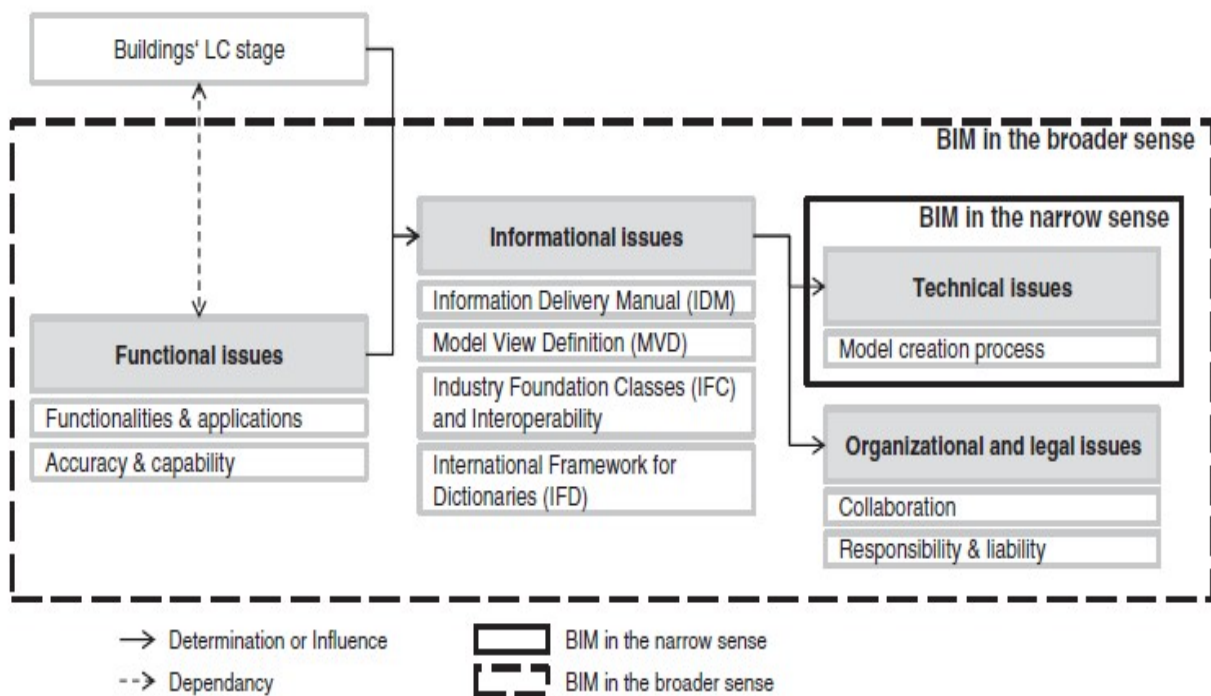


Figure III. 1 Relations entre les étapes du cycle de vie du bâtiment (LC) et les enjeux fonctionnels, informationnels, techniques et organisationnels du BIM

Comme le montre la Fig. 1, le BIM au sens large (« BIG BIM » [11],[28]) peut être divisés en questions fonctionnelles, informationnelles, techniques et organisationnelles/juridiques interdépendantes. En fonction des besoins des parties prenantes et des exigences du projet, un modèle BIM est utilisé pour soutenir et réaliser des services d'expertise pour les bâtiments tels que des analyses énergétiques ou environnementales [5]. Par conséquent, deux types de logiciels experts peuvent interagir avec un modèle BIM : (1) les applications d'entrée de données fournissant des services d'importation, de capture et de surveillance des données, de traitement des données ou de transformation des données capturées en BIM ou (2) les

applications de sortie de données fournissant des rapports ou des analyses techniques telles que les analyses structurelles et énergétiques ou les détections de collisions.

Aussi Selon l'association francophone Mediaconstruct et une grande majorité de chercheurs, il existe un consensus sur deux définitions du BIM. Une définition le désigne sous le nom de « modèle d'information du bâtiment » ou modèle numérique (MN), qui représente les caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment sous forme numérique. Le BIM sert de ressource de connaissances partagée pour les informations sur les bâtiments et fournit une base fiable pour la prise de décisions tout au long du cycle de vie du bâtiment. En outre, le BIM transcende la simple modélisation des bâtiments en incluant une représentation 3D. Il peut être considéré comme une base de données technique, une collection structurée d'informations relatives à un bâtiment existant ou prévu. Cette base de données est conforme à la normalisation, est partagée entre les parties prenantes et possède la capacité d'englober toutes les informations techniques de la structure construite, de la conception à l'exploitation. Il inclut les objets constitutifs du bâtiment, leurs attributs et les interrelations entre ces objets. Par conséquent, le BIM englobe la composition détaillée d'un mur, le positionnement précis des équipements ou du mobilier dans une pièce. Ces informations complètent la description purement géométrique du bâtiment produite par un logiciel de CAO à des fins de construction.

De façon complémentaire, il est également possible de l'appeler « modélisation des informations du bâtiment », qui sert de processus métier pour générer et utiliser les données de la construction afin de la concevoir, de la construire et de l'exploiter tout au long de son cycle de vie. Dans ce contexte particulier, le BIM est considéré comme un processus d'échange de modèles numériques de manière collaborative au sein d'une entreprise ou entre différentes professions. Plus généralement, conformément à la littérature scientifique et aux recherches de Succar, comme le montre la figure 2, cet acronyme peut prendre différentes significations et être utilisé pour décrire de nombreuses intentions (Succar, 2009a).

8Positionnement et enjeux : Le BIM en rénovation

De manière complémentaire, il peut également s'agir de « Building Information Modeling » en tant que « processus métier de génération et d'utilisation des données du bâtiment pour le concevoir, le construire et l'exploiter durant tout son cycle de vie. Dans ce cadre, le BIM est un processus d'échanges autour de maquettes numériques dans un esprit de travail collaboratif interne à une entreprise ou interprofessionnel ». De manière plus générale, au regard de la littérature scientifique et des travaux de Succar,

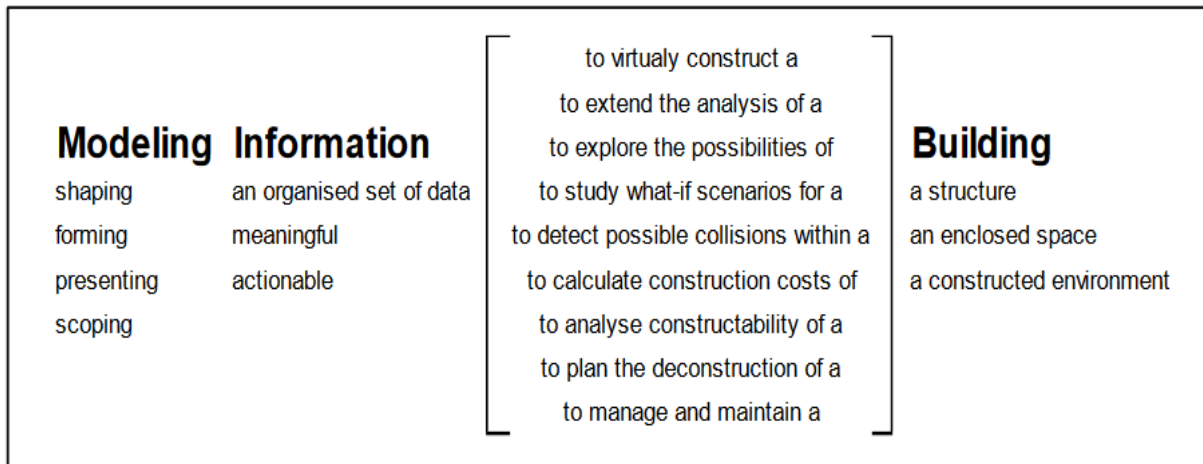


Figure III. 2 Synthèse des connotations des termes Building Information Modeling selon Succar 2009a

cet acronyme peut également prendre, comme l'illustre la Figure II.2, une multitude de sens et être utilisé pour décrire de nombreuses intentions (Succar, 2009a).

En fonction des différentes définitions que nous avons déjà parcouru, trois définitions semblent ressortir, selon le déroulement du sigle que l'on adopte[29]:

* Building Information **Model** : ce lui de la maquette numérique, un premier niveau où le système de représentation soit en trois dimensions et créé avec un logiciel métiers alliant objets, géo localisation, géométrie , informatique...etc. En ce niveau la création et l'utilisation de la MN ce fait de manière isolée.

* Building information **modeling** : un deuxième niveau qui introduit le processus conceptuel de travail de ceux qui utilisent ces outils, dans un esprit de constitution de base de données autour du projet échange entre ces acteurs. Ce processus est basé sur l'analyse et la modélisation des différents phénomènes. Le comportement de la structure, l'optimisation énergétique des bâtiments, la maîtrise du son, etc., sont des phénomènes gérés par des logiciels spécialisés interopérables entre eux.

* Building information **management** : présente le troisième niveau qui est un processus de gestion du projet le long de son cycle de vie, à travers des outils de la maquette numérique cela correspond à l'établissement d'une plate-forme collaborative qui organise et contrôle le partage des informations entre les acteurs tout le long du processus.

III.3.Naissance et historique du BIM

Pour avoir une idée sur l'histoire du BIM et de ses systèmes, nous devons remonter aux débuts de l'informatique et approfondir ses fondements conceptuels. La conception assistée par ordinateur et la fabrication assistée par ordinateur étaient deux technologies qui ont soudainement émergé séparément au début des années 1960. Les logiciels de FAO et de CAO peuvent se croiser et se recouper pour devenir une force puissante dans l'industrie (American Machinist, 1999).

En 1957, le Dr. Patrick J. Hanratty a développé le premier logiciel commercial de fabrication assistée par ordinateur (FAO) connue par l'appellation: PRONTO. Il s'agit d'une technique d'usinage CNC (computer numerical control) qui a ensuite évolué vers la fabrication assistée par ordinateur. Peu de temps après, il s'est impliqué dans les graphiques générés par ordinateur, développant la conception automatisée par ordinateur (CAO), le premier système CAM / CAD à utiliser des graphiques interactifs, en 1961, et a été utilisé par Général Motors pour faire des matrices de moulage complexes.

En 1962, dans un article intitulé " augmenting human intellect a conceptual framework " écrit par Douglas C. Englebert. Où il défend l'état d'esprit des architectes de demain, proposant une conception orienté objet, la manipulation paramétrique des bases de données relationnelles (Bergin 2011)

L'architecte concepteur commence à entrer un ensemble de spécifications et de données par exemple d'une dalle de plancher de quinze centimètres d'épaisseur, des murs en béton vingt centimètres d'épaisseur et de deux mètres de hauteur dans l'excavation, et ainsi de suite, pour avoir en fin la structure qui commence prendre forme. Il l'examine, l'ajuste, etc. Ces listes deviennent progressivement plus détaillées, formant une structure imbriquée qui représente l'évolution de la pensée derrière les conceptions actuelles ". A cet époque plusieurs chercheurs en conception travaillent sur une technologie similaire au Système d'Information Géographique (SIG).

En 1963, Ivan Sutherland le premier qui a développé "Sketchpad" au MIT Lincolnd Labs, la première conception assistée par ordinateur (CAO) avec une interface utilisateur graphique.

Entre autres choses, il était avant-gardiste en termes d'interaction homme-machine et une avancée majeure dans le développement de l'infographie (Sutherland, 2003).

Structurellement, Sketchpad a été remplacé par des programmes de modélisation solide qui ont perfectionné la représentation numérique de la géométrie, permettant l'affichage et l'enregistrement d'informations géométriques. Deux approches principales ont émergé dans les années 1970 et 1980 : la géométrie de construction solide (GCS) et la représentation des frontières (B-rep). Pour cela le défi consistait à faciliter au maximum le contrôle de l'ordinateur tout au long du processus de conception.

En 1975, Charles Eastman a publié un article intitulé " The Use of Computers Instead of Drawings In Building" 'expliquant un prototype appelé Building Description System (BDS). Idées de conception paramétrique et représentations 3D calculables de haute qualité. L'article d'Eastman décrit essentiellement le BIM tel que nous le connaissons aujourd'hui. Eastman a développé un programme qui permet aux utilisateurs d'accéder à une base de données triable et de récupérer des informations catégoriquement par attributs (y compris le matériau et le fournisseur). Une interface utilisateur graphique, des vues orthographiques et en perspective ont également été utilisées. BDS est l'un des premiers projets de l'histoire du BIM à réussir à créer cette base de données de bâtiments. Nous avons décrit des éléments de bibliothèque individuels qui peuvent être récupérés et ajoutés aux modèles (Bergin, 2011). Eastman conclut que BDS améliore l'efficacité de la conception et de l'analyse et réduit les coûts de conception de plus de 50 %. BDS était une expérience qui a identifié les problèmes de conception architecturale les plus fondamentaux des 50 prochaines années. REF scholar (8) ris

En 1977, Charles Eastman a développé GLIDE (un outil graphique). Language for Interactive Design) a été développé au CMU Lab et inclut la plupart des dernières fonctionnalités BIM. plate-forme. Les années 80 sont là et certains systèmes se développent partout. Il devient de plus en plus populaire dans l'industrie et est parfois également utilisé dans des projets de construction. En 1986, RUCAPS (Really Universal Computer-Aided Production System) a été utilisé pour soutenir la rénovation du terminal 3 de l'aéroport d'Heathrow. Il s'agit du premier programme de CAO utilisé dans la construction préfabriquée (ou temporaire) (techniquement la phase de construction) dans l'histoire du BIM. Il est considéré comme le prédécesseur du logiciel BIM actuel (Eastman et al, 2008).

Alors qu'aux États-Unis et en Grande-Bretagne, les développements progressent à grande vitesse, en Hongrie communiste, un génie de l'informatique et de la programmation fait passer des ordinateurs Apple malgré le rideau de fer, afin de développer des logiciels qui plus tard, changera le cours de l'histoire du BIM tant du point de vue de son concept que de sa

commercialisation et lui permettra de devenir tel que nous le connaissons aujourd'hui (Arnold, 2002).

En 1982, Gábor Bojár a commencé à développer l'ArchiCAD, en utilisant une technologie similaire au Building Description System, Et en 1984, Bojár a publié CH Radar de Graphisoft pour l'Apple Lisa OS. Relancé en 1987 sous le nom d'ArchiCAD, qui présente le premier logiciel de conception assisté par ordinateur disponible sur un ordinateur personnel (Bergin, 2011). [30]

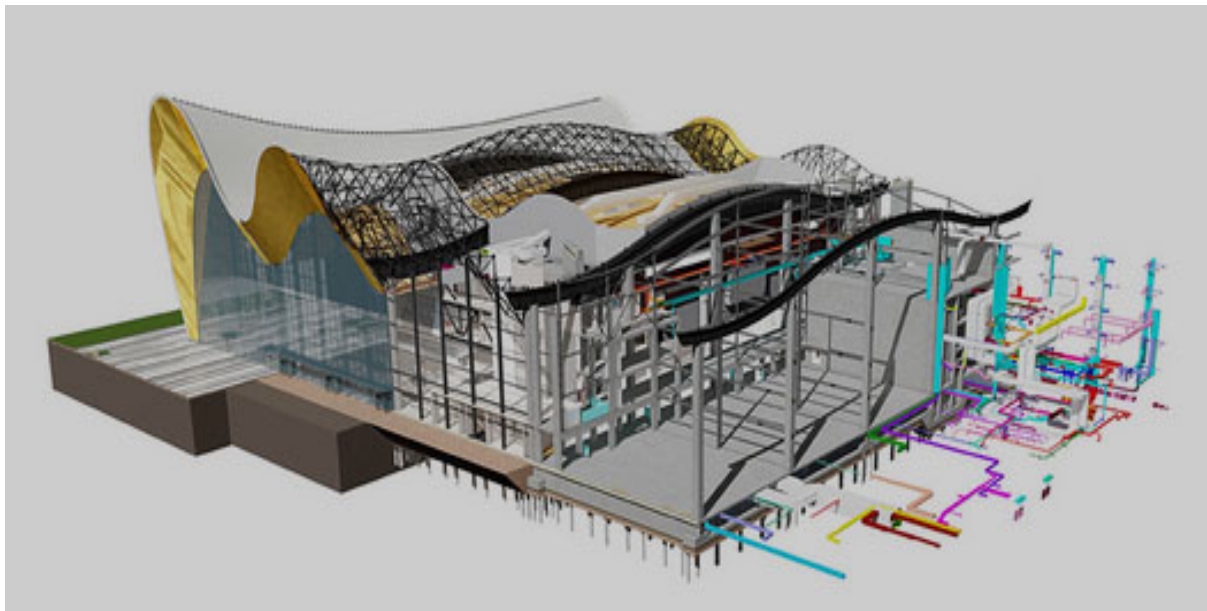


Figure III. 3 Archicad model de CPU Pride projet à Moscow

En 1985 au état -Unis, Diehl Graphisoft développe le Vectorworks, qui était aussi parmi les premier logiciel CAO, de modélisation en 3D et application multiplateforme présentant les capacités du BIM. Dans cette période que le Parametric Technology Corporation (PTC) est aparu.

En 1987, lorsque ArchiCAD a été mis en œuvre en tant que concept de construction virtuelle, Tekla a terminé ses dessins combinés et ses bases de données relationnelles pour la première version du système BIM.

En 1988 PTC a publié le Pro/ENGINEER qui est considéré comme le premier logiciel commercial de conception et de modélisation paramétrique de l'histoire du BIM. Irwin Jungreis et Leonid Raiz ont décidé de quitter PTC et de créer leur propre société de logiciels, Charles River Software. Ils souhaitent développer une version spécifique à l'architecture de Pro/ENGINEER, capable de gérer des projets plus complexes que l'Archi-CAD.

Vers les années 2000, le programme avait introduit Revit. Revit a révolutionné le BIM en utilisant un moteur de changement paramétrique rendu possible grâce à la programmation orientée objet et en créant une plateforme permettant d'ajouter des attributs de temps. Robert Aish a été le premier à documenter l'utilisation du terme « Modélisation du bâtiment » dans un article publié en 1986. Dans cet article, il défendait ce que nous appelons aujourd'hui le BIM et la technologie pour le mettre en œuvre. Quelques années plus tard, la première utilisation documentée du terme « Modèle d'information du bâtiment » apparut dans un article de G.A. Van Nederveen et F. Tolman dans le numéro de décembre 1992 *Automation in Construction*.

En 1995, le format standard de fichier International Class (IFC) est développé. Ce format a été développé pour permettre le flux de données entre les plates-formes et pour assurer la compatibilité générale des fichiers avec divers programmes BIM. En 1997, ArchiCAD a lancé la première solution de travail d'équipe basée sur le partage de fichiers. Cela a développé la collaboration en équipe, permettant d'avantage les architectes et les ingénieurs de travailler simultanément sur des modèles architecturaux. Les mises à jour ultérieures de Teamwork ont permis l'accès à distance au même projet via le réseau d'internet, permettant ainsi la collaboration et la coordination sur des projets plus importants.

En 2001, NavisWorks a développé et commercialisé JetStream, un logiciel de revue de conception 3D qui offre un ensemble d'outils pour la navigation CAO 3D, la collaboration, et la coordination. JetStream a essentiellement coordonné différentes données de format de fichier et simulation de construction autorisée et détection des problèmes. Lorsque Revit a publié sa mise à jour, Revit6, en 2004, cela a ouvert la voie à de plus grandes équipes d'architectes et ingénieurs pour collaborer dans un modèle intégré logiciel. Alors qu'Autodesk s'efforçait de prendre la tête du jeu BIM, elle a acquis Revit en 2002, NavisWorks en 2007, parmi autre plus petit ? Systèmes B)M.) en retard ?, Autodesk format développé. Format est une application qui permet la conception d'une maquette BIM sur un appareil mobile. (ref is 3D,4D and 5D Building Information Modeling for Commercial Building Projects dans biblio mendeley).

Le BIM, jusqu'à une période proche, était réservé essentiellement aux grands projets de prestige, à l'architecture plus complexe. Il est déjà opérationnel pour s'imposer auprès de tous les intervenants du secteur du BTP. Cette méthode de modélisation, de présentation et d'échange de données tout au long de la vie d'un bâtiment est déjà connue des entreprises et des bureaux d'études d'envergure internationale et devrait être adoptée pour les marchés publics. Les états de l'union européen suivent en effet les recommandations de leurs parlement

qui s'est engagé à rendre le BIM obligatoire dans tous les appels d'offres publics à partir de 2017. La Grande-Bretagne donne déjà l'exemple. Depuis 2011, le gouvernement britannique encourage l'utilisation progressive du BIM dans le but d'améliorer de 20 % l'efficacité du secteur de la construction. Les premiers retours font état de progrès notables en matière de contrôle budgétaire et de planification des travaux. Dans le même temps, des initiatives de conception collaborative émergent qui nécessitent des outils de gestion de projet spécialisés. La diffusion du BIM équivaut à la systématisation et à la diffusion de ce que l'on appelle les « nouvelles technologies » dans la conception, la gestion de la construction et l'entretien des bâtiments. Il s'agit d'un phénomène international affectant les outils de représentation, de modélisation, de communication et de visualisation. Cette richesse d'outils et de moyens pour concevoir, calculer, gérer et communiquer crée une situation complexe et parfois déroutante qui devrait changer à terme notre manière de travailler et de construire. Cependant, les premières expérimentations menées par les professionnels de la construction combinées aux efforts des chercheurs ont progressivement stabilisé les multiples définitions du BIM.

III.1.1 Le BIM autour du monde

Il est difficile de connaître quels sont les pays les plus avancés en adoption de l'usage du BIM, en temps que pratiques émergentes. Selon le rapport annuel d'activité 2012, BuildingSMART après son initiative d'appel à la participation des pays à intérêt du BIM était révélatrice, et que le BIM est présent dans les pays suivants:

- * Europe: Norvège, pays nordiques (Suède, Finlande, Danemark), pays francophones, pays germanophones, Benelux (Belgique, Nederland, Luxembourg), Royaume-Uni et Irlande, Italie et Espagne;

- * Amérique du Nord: Canada, Etats Unis;

- * Pays du moyen-Orient et d'Afrique du Nord;

- * Australie et Nouvelle-Zélande;

- * Asie: Japon, Chine, Singapour et Corée du Sud.

III.1.2 Au Etats-Unis

Le Bureau central des statistiques des États-Unis (GSA) possède ou loue 8 500 bâtiments, soit 37 millions de pieds carrés. GSA a joué un rôle clé dans la promotion des utilisateurs du BIM à travers le programme national 3D-4D-BIM[3]. Le BIM est requis pour tous les grands projets à partir de 2017 afin d'automatiser la vérification de la conformité des projets avec le programme. NIBS, qui représente BuildingSmart en Amérique du Nord, a publié le National BIM Standard-United States, la norme nationale pour le BIM aux États-Unis [52]. Le Wisconsin, premier État américain à exiger le BIM pour ces travaux, a publié un guide BIM pour les chefs de projet [53] en juillet 2012. La ville de New York a également publié un guide BIM [54] en juillet 2012. En juillet 2010, le groupe de recherche CIC de l'Université de

Pennsylvanie a publié un guide expliquant comment créer un plan d'assurance qualité BIM[53] pour les projets.

III.1.1. Royaume-Uni

On en parle beaucoup depuis que le gouvernement, en mai 2011, a publié sa stratégie [10] pour une réduction des coûts de 20 % d'ici la fin de son mandat. L'usage du BIM est l'un des moyens permettant d'atteindre cet objectif. Pour impulser le changement et donner l'exemple, le gouvernement exigera que le BIM soit utilisé pour ses projets au plus tard en 2016[1]. Cet engagement explique sans doute l'évolution des résultats de l'enquête annuelle effectuée depuis 2010. Si 43 % des sondés n'avaient pas entendu parler du BIM en 2010 ils ne sont plus que 6 % deux ans plus tard; 43 % des sondés utilisent déjà le BIM en 2012 et 93 % prévoient de l'utiliser cinq ans plus tard.

III.1.2. Finlande

Senate Properties gère un patrimoine de 5 millions de mètres carrés. Après de nombreux projets pilotes, cet organisme a rendu le BIM obligatoire à partir du 1er octobre 2007 pour tous les projets de plus de 2 millions d'euros. Il publia alors des spécifications très détaillées et une présentation phase par phase [52] dont sont extraits les deux exemples suivants. Chaque

maison symbolise de produit de BIM. La couleur verte signifie qu'il est possible de produire le BIM avec les versions commerciales des logiciels. la couleur jaune indique que le BIM est demandé au cas par cas et la couleur rouge est réservée à ce qui n'est pas

opérationnel, comme l'expression des contraintes réglementaires. En phase esquisse, il est obligatoire de produire le BIM des bâtiments existants et de leur environnement, ainsi que celui de chaque esquisse. Le BIM structure et fluides sont demandés au cas par cas. C'est à partir de BIM des esquisses que sont appréciés le coût, les performances énergétiques et les formes.

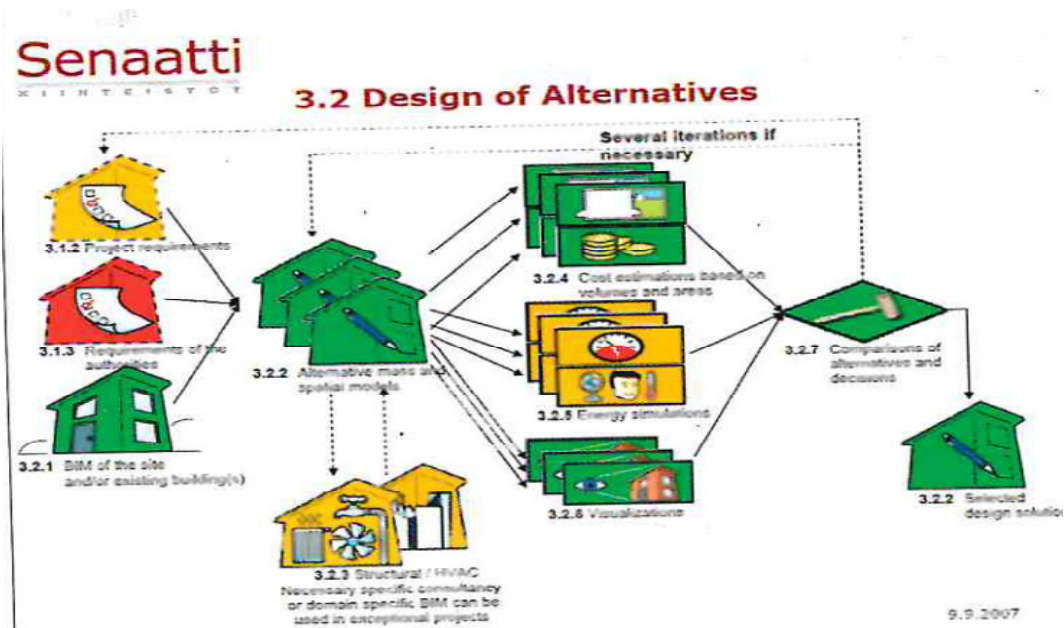


Figure III. 4 Désigne des alternatives en phase d'esquisse par le BIM

Source : O.Celnik et d'E. Lebègue BIM et maquette Numérique p64

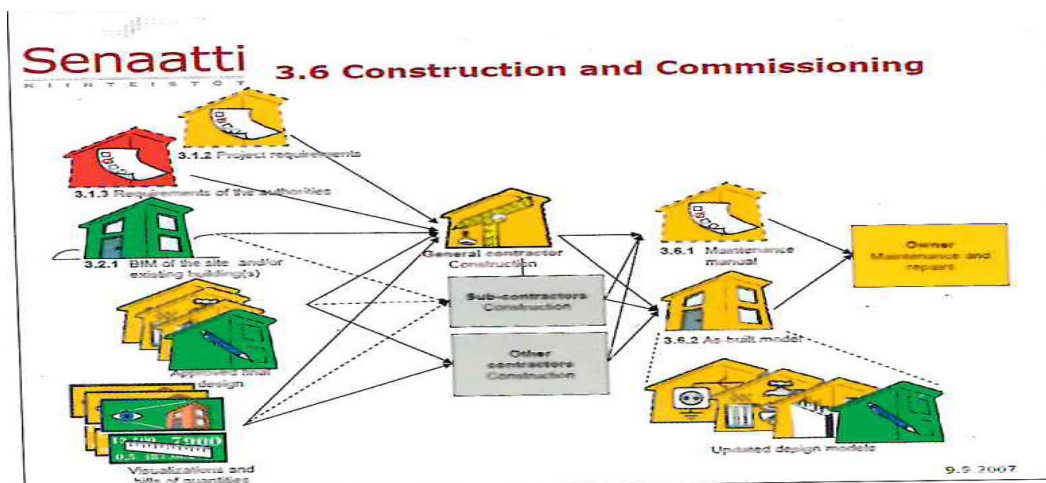


Figure III. 5 Le BIM de l'existant en fin de conception

Source : O.Celnik et d'E. Lebègue BIM et maquette Numérique p64

Dans le deuxième schéma, on retrouve le BIM de l'existant, celui obtenu en fin de conception, celui de l'entreprise et, enfin, le BIM du bâtiment tel que construit qui servira aux activités d'exploitation et de maintenance. En mars 2002, BuildingSMART Finland a publié une nouvelle version des spécifications (common BIM Requirement 2012[51]) comportant la révision des neuf séries déjà publiées en 2007 et de trois nouvelles série. Ce sont, à notre connaissance, les spécifications les plus détaillées sur le contenu d'un BIM et les procédures associées. Elles ont été une des sources d'inspiration de la charte de BIM de la région Bourgogne.

III.1.3. Autres pays

Le BIM est aussi présent dans les pays comme:

III.1.4. Norvège:

Pour gérer la patrimoine immobilier de l'état du Norvège, la maquette numérique est déjà obligatoire depuis 2010 pour tout projet de construction ou de réhabilitation, mené par l'organisme de l'administration publique Norvégien chargé des biens publics (StatsBygg). En défendant et finançant la création des formats de fichier IFC. Une organisation appelée SINTEF leader, mène également des recherches sur la maquette numérique dans le cadre du programme national norvégien de développement axé sur des outils durables afin d'améliorer la construction et la gestion des bâtiments.

III.1.5. Danemark:

L'utilisation du BIM n'a cessé de croître depuis 2000 ; en 2006, 50 % des architectes utilisaient le BIM sur au moins un projet. En 2007, l'utilisation du BIM a été rendue obligatoire pour tous les projets publics nationaux, et en 2011 cette obligation a été étendue à toutes les agences régionales et locales. Le Danemark a chargé les agences d'État (notamment l'Agence des palais et des domaines, l'Agence danoise des domaines universitaires et l'Agence de construction de défense) d'adopter des pratiques BIM de plus en plus avancées, tandis que d'autres organisations privées et universités les soutiennent par le biais d'activités de recherche et de développement.

III.1.6. Suède:

En Suède, l'Institut suédois de normalisation (SIS) a publié depuis 1991 une série de lignes directrices sur la promotion du BIM dans le pays. Depuis 2014, la Swedish BIM Alliance rassemble de grandes organisations des secteurs public et privé avec un seul objectif : trouver des ressources supplémentaires pour soutenir l'innovation dans la construction. L'adoption du BIM est répandue en Suède et, malgré l'absence de directives claires de la part du gouvernement, les meilleurs exemples ont émergé. Historiquement, le pays est le deuxième derrière les États-Unis en matière de publication d'articles scientifiques sur le BIM. Le gouvernement a également lancé des initiatives pour promouvoir la mise en œuvre du BIM au niveau public, avec des organisations nationales telles que l'administration suédoise des transports rendant le BIM obligatoire depuis 2015[53]

III.1.7. Chine:

L'adoption du BIM en Chine a considérablement augmenté depuis 2016. Les experts chinois de l'AEC et plusieurs organisations ont établi des directives de mise en œuvre du BIM de haut niveau pour la croissance et la numérisation. Le BIM est devenu un élément important et est désormais utilisé dans la plupart des projets. Le gouvernement chinois est également soucieux des lignes directrices pour la mise en œuvre du BIM. Même si le BIM n'est pas encore obligatoire, son utilisation est fortement recommandée. Bien que la Chine soit un grand pays doté d'une économie émergente, le secteur de la construction est très fragmenté au niveau régional. Malgré cette situation, la mise en œuvre du BIM est devenue très importante.

III.1.8. Australie:

Le secteur de la construction contribue de manière significative à la croissance économique de l'Australie. Environ 7,8 % du PIB total provient du secteur de la construction. Pour accroître l'efficacité du processus de construction, les professionnels se tournent vers le BIM. La mise en œuvre du BIM en Australie reste fragmentée en raison du manque d'approche cohérente. Seules quelques entreprises privées ont mis en œuvre le BIM. Cependant, cela manque de cohérence. En 2016, le gouvernement a appelé à la création d'un groupe de travail sur les infrastructures intelligentes pour assurer la mise en œuvre réussie du BIM dans tous les projets publics de plus de 50 millions de dollars. La croissance du marché australien du BIM devrait atteindre 6,5 milliards de dollars en 2020.

III.1.9. Russie:

La Russie vise à devenir l'un des pays leaders dans la mise en œuvre des méthodes BIM dans le secteur de la construction et envisage et souhaite exporter ses capacités dans le monde entier. Selon un rapport intitulé « Building Information Modeling (BIM) Market for Solutions, End-Users and Vertical Markets – Opportunities and Forecasts to 2022 » préparé par Allied Market Research, le marché du BIM atteindra 11,7 milliards de dollars en 2022. Le taux de croissance est de +21,6%. En particulier, la demande de services BIM dans les pays d'Asie et du Caucase devrait croître rapidement en raison du développement continu des activités de construction. Il s'agit d'une opportunité de marché que la Russie ne veut pas le rater. Aujourd'hui, Comme dans de nombreux pays, la mise en œuvre du BIM progresse en Russie, mais reste hétérogène. Les plus grandes entreprises ont fait de grands progrès, s'inspirant de projets pilotes déjà lancés (bâtiments résidentiels, industriels et hospitaliers principalement), investissant dans la formation, promouvant une « culture BIM » et la technologie. Les principales entreprises de construction russes apprennent à tirer le meilleur parti du BIM et à le développer davantage, à l'instar de pays leaders dans leur secteur comme le Royaume-Uni. La Russie dispose désormais de tous les outils nécessaires pour mettre en œuvre le BIM de manière indépendante et plus rapide qu'auparavant. A cet égard, les moyennes et grandes entreprises bénéficient également des compétences spécifiques BIM acquises grâce aux grands projets et aux équipes de conception internationales travaillant ou ayant travaillé en Russie. En revanche, les bureaux d'études, les maîtres d'ouvrage et les petites et moyennes entreprises ont encore peu d'expérience en matière de BIM. Ils se posent encore de nombreuses questions et sont même sceptiques quant à l'utilisation du BIM. Il est de la responsabilité de l'établissement d'enseignement de promouvoir et de diffuser les avantages de l'application.

Le gouvernement russe est attiré par le BIM en raison de son efficacité et des économies potentielles qu'il apporte, ainsi que de son importance pour la croissance économique des pays qui exportent des capacités BIM vers d'autres pays et, à leur tour, dépendent des contributions russes. Certaines des organisations les plus importantes et les plus progressistes de Russie s'orientent déjà dans cette direction, aidées en partie par la poussée vers la mondialisation, qui a rapproché et connecté les différents marchés de la construction. De nombreux termes, normes et standards russes deviennent automatiquement des références pour certains pays du Caucase et de l'ex-Union soviétique. La Russie est en mesure de soutenir la transformation

qu'offre le BIM et, en tant que plus grand pays géographiquement du monde, a de grandes ambitions pour devenir l'un des leaders mondiaux dans le domaine du BIM.

III.1.10. Singapour:

À Singapour, la BCA (Building and Construction Authority) a mis en œuvre une feuille de route BIM en 2010 dans le but que 80 % du secteur de la construction utilise le BIM à l'horizon de 2015 [54]. Cela fait partie du plan du gouvernement visant à améliorer la productivité jusqu'à 25 % au cours de la prochaine décennie. Pour permettre au secteur public de prendre les devants, BCA a collaboré avec les GPE (entités de passation des marchés publics) pour demander l'utilisation du BIM pour leurs projets à partir de 2012. Il s'agit d'une politique remarquable pour diriger l'industrie de la construction à Singapour

BCA a publié le Guide BIM de Singapour et le Conditions Particulières BIM en 2012 [55]. Le guide BIM est partie des efforts de l'industrie pour démystifier le BIM et clarifier les exigences de l'utilisation du BIM à différentes étapes d'un projet. L'utilisation du BIM peut être intégré au projet dans le cadre de la portée de la prestations au titre de la convention principale à l'aide des conditions particulières BIM. Le guide essentiel BIM pour le plan d'exécution BIM [56] comprend un modèle de plan d'exécution BIM nécessaire pour chaque projet de construction. Il est obligatoire pour les nouveaux projets de construction de plus de 5 000 m² d'utiliser la soumission électronique BIM via Corenet sur le Web [57].

III.1.11. France:

L'utilisation de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) en France reste relativement limitée par rapport à d'autres pays. Néanmoins, les technologies et méthodologies BIM suscitent un intérêt et une acceptation croissants dans le secteur de la construction, en particulier parmi les cabinets d'architectes. L'ampleur de l'adoption varie selon les agences, ce qui nécessite une compréhension globale des facteurs influençant le succès ou l'échec de la mise en œuvre du BIM, en particulier au cours des étapes initiales [56] [55]. De plus, l'arrivée de la pandémie de COVID-19 a également eu un impact sur l'adoption du BIM en France, incitant les agences à explorer de nouveaux outils collaboratifs et leurs contributions à l'intégration du BIM dans les pratiques architecturales [53]. La gestion du changement joue un rôle essentiel dans la réussite des initiatives BIM, ce qui nécessite la mise en œuvre de stratégies efficaces pour superviser la métamorphose technologique et organisationnelle qu'elle implique [55].

III.1.12. Algérie:

L'utilisation de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) en Algérie se heurte à de nombreuses difficultés. Les architectes algériens considèrent les individus et les éléments politiques comme les principaux obstacles à l'exécution du BIM [58]. Néanmoins, les architectes employés par les entreprises de conception sont plus disposés et sensibilisés à l'adoption du BIM que leurs homologues travaillant pour les maîtres d'ouvrage et les entrepreneurs [59]. En outre, des disparités existent dans les niveaux de maturité du BIM entre les grandes et les petites organisations en Algérie [57]. L'industrie algérienne de la construction manque de connaissances en matière de techniques de gestion de projet, ce qui nuit à l'organisation efficace des projets [57]. Pour surmonter ces obstacles, une formation approfondie et la participation active des autorités locales et des décideurs politiques sont impératives [53]. La mise en œuvre de la méthodologie BIM dans la conception structurelle a démontré des améliorations significatives de la qualité du processus de conception. Malgré certaines limites, l'adoption du BIM est indispensable pour améliorer le processus dans le secteur de l'AEC.

III.2. Le BIM entre Processus et Outil:

Le BIM fait référence à l'échange et à l'avancement d'informations concernant un bâtiment (qu'il s'agisse d'une rénovation ou d'une nouvelle construction) à l'aide de ressources technologiques de pointe, le modèle numérique paramétrique et informé étant l'un des principaux outils utilisés.

S'il est exécuté de manière organisée, ce processus réunit et supervise une base de données harmonisée et cohérente. Il n'est pas difficile de concevoir que l'afflux d'informations de haute qualité produites par des professionnels, même lors qu'elles sont traitées par des instruments puissants, ne peut pas être géré de manière autonome, mais nécessite une coordination et une planification stratégique. Par conséquent, l'aspect managérial joue un rôle important dans le processus, garantissant que son fonctionnement dynamique s'adapte en permanence aux exigences du projet.

Le processus BIM permet non seulement d'acquérir une représentation visuelle d'une structure ou d'un objet, mais elle aboutit également à un référentiel complet d'informations à la fois dynamique et multidisciplinaire.

Un modèle BIM a la capacité d'englober tout type de données, les données les plus couramment considérées étant les suivantes :

- Positionnement géographique ;
- Mesures géométriques et volumétriques ;
- Propriétés des matériaux et composants techniques ;
- Les étapes de mise en œuvre ;
- Des plans techniques ;
- De la documentation ;
- Procédures de maintenance.

Et grâce au processus BIM, il est possible d'obtenir une représentation numérique de la durée de vie complète des constructions et des infrastructures (de la planification initiale au réaménagement), favorisant ainsi l'échange fluide et la compatibilité des informations.

La façon de réaliser l'exécution d'une procédure de modélisation des informations du bâtiment (BIM) nécessite que chaque professionnel exécute son segment conceptuel respectif à l'aide du logiciel de conception BIM qu'il a désigné. Grâce à la méthodologie BIM, les professionnels peuvent ensuite échanger des fichiers au format Industry Foundation Classes (IFC) tout en préservant l'intégralité des informations. Le résultat final est un modèle unique qui fusionne toutes les informations provenant des diverses disciplines impliquées.

Cette approche collaborative du processus de gestion du BIM permet le transfert d'informations sans interruption et présente des avantages substantiels en termes de supervision et d'administration d'un actif tout au long de son cycle de vie.

La procédure BIM représente donc un véritable tournant dans le secteur de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction (AEC), permettant à toutes les parties prenantes impliquées (architectes, ingénieurs, entrepreneurs) de travailler de manière collaborative, rapide et efficace sur un modèle unique, économisant ainsi du temps et des coûts.

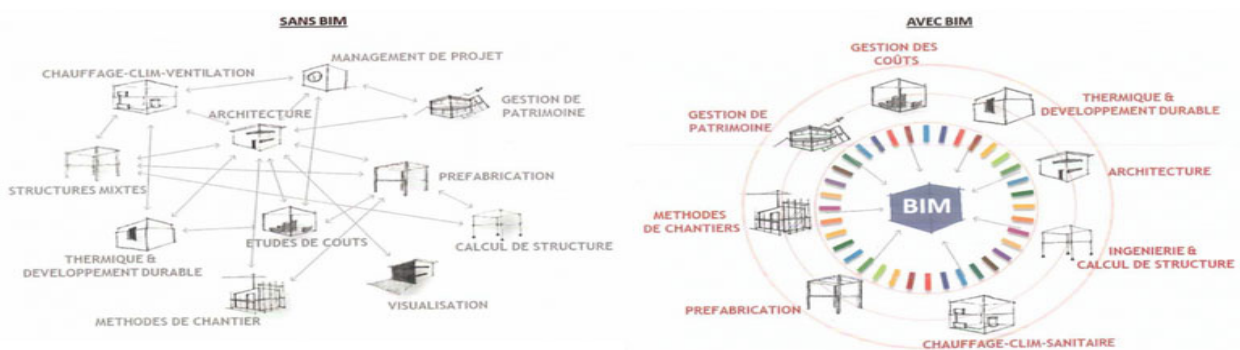


Figure III. 6 Méthode traditionnelle comparée à une approche BIM

III.3. Le passage au BIM

Le BIM, ou plutôt les logiciels BIM comme ArchiCAD, existe depuis une trentaine d'années. Alors pourquoi cette soudaine frénésie et cette course à l'adoption du BIM? Tout d'abord la récente progression fulgurante de la puissance des ordinateurs permet maintenant d'utiliser des solutions qui n'étaient pas disponibles pour le grand public. Ensuite plusieurs autres raisons, écologiques et économiques, ont favorisé l'adoption et le passage au BIM :

III.4. La volonté de réduire les émissions de carbone et de gaz à effet de serre

Les gouvernements qui adoptent ou sont sur le point d'adopter le BIM le font souvent en relation avec une obligation légale de réduire les émissions de carbone et de gaz à effets de serre. Cette réduction ne peut se faire avec les méthodes de travail actuellement en vigueur dans la construction. Une nouvelle façon de travailler doit être mise en place et le BIM s'est naturellement imposé comme une des solutions ayant le potentiel de transformer les habitudes et de structurer l'industrie de la construction.

III.5. Les différents niveaux du BIM

Le BIM a plusieurs niveaux, appelés niveaux de maturité. Ces niveaux sont en fait des étapes vers le BIM collaboratif. Les niveaux 0,1 et 2 ne doivent donc être considérés que comme des étapes et non pas une fin en soi. Les descriptions ci-dessous correspondent aux niveaux utilisés au Royaume-Uni, mais il semblerait que ceux-ci soient reconnus ailleurs également.

III.5.1. BIM Niveau 0

Souvent référé comme CAO 2D non gérée ou non structurée. C'est le niveau où pas mal toute notre industrie se trouve actuellement. En effet les normes de présentation ISO n'ont jamais vraiment réussi à s'imposer comme elles l'ont fait dans les autres industries. Il y a bien des normes de dessin qui sont appliquées, mais il semblerait que chacun utilise les siennes.

La collaboration est donc difficile, d'autant plus si on considère que beaucoup de projets ne sont pas géo-référencés, n'ont pas les mêmes unités ou qu'une rotation a été appliquée. Et je ne parle pas des noms et couleurs de calques différents, des fichiers d'impression et polices de texte exotiques...

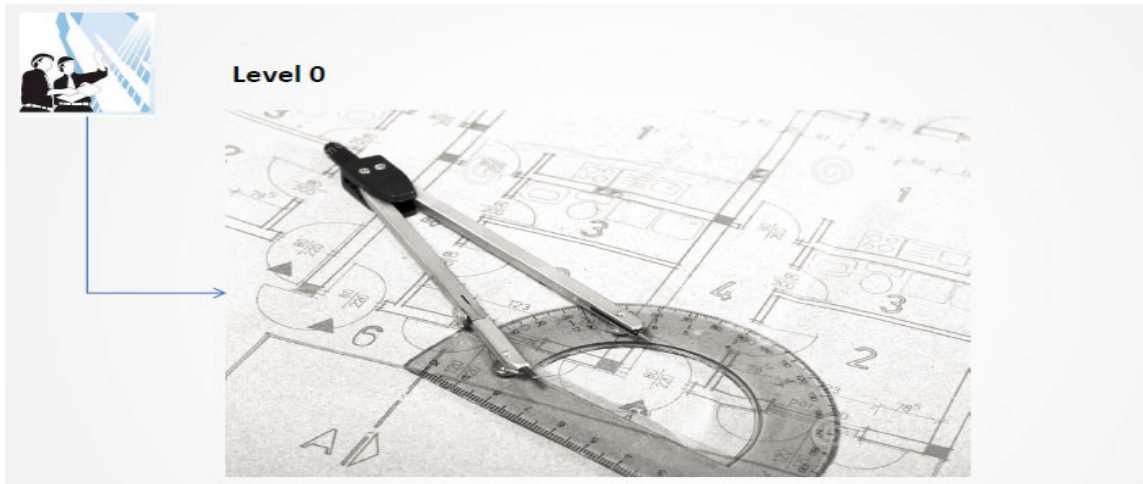


Figure III. 7 Approche historique (pas de modèle explicite, seulement des vues)

III.5.2. BIM Niveau 1

Souvent référé comme le BIM en isolation (lonely BIM). Un mélange de 2D et de maquette numérique 3D. Mais attention ! Le BIM en isolation ne veut pas dire produire des données de manière désordonnée comme pour la CAO 2D. Les données doivent être structurées, c'est à dire répondre à une norme (en Angleterre BS 1192:2007). Cette norme doit régir entre autres la numérotation des plans, la géolocalisation, la présentation, le système d'approbation et de diffusion des plans, etc.

Il n'y a pas de collaboration à proprement parlé à ce niveau-là car chacun publie et met à jour ses données individuellement. Le partage électronique et la diffusion des plans habituellement 2D (PDF ou fichiers natifs) entre les différents acteurs se fait via un Environnement de Données Commun, comme par exemple Autodesk A360, Graphisoft BIMx ou Trimble Connect.

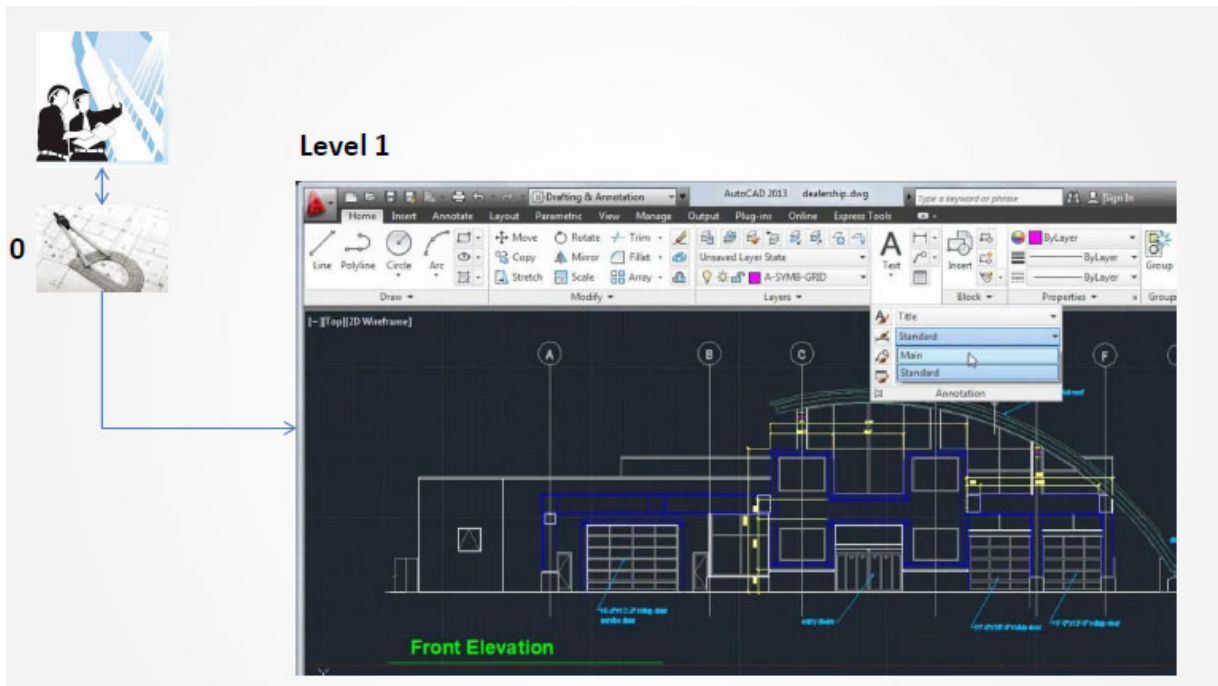


Figure III. 8 Modèle purement géométrique de dessin assisté par ordinateur (principalement des vues 2D par AutoCAD)

III.5.3. BIM Niveau 2

Cette fois la collaboration commence! Chacun produit une maquette numérique 3D dans son coin (architecte, ingénieurs, MEP, etc). Alors où est la collaboration? Et bien c'est dans la façon d'échanger ces modèles. En effet, et c'est crucial à ce niveau, les différents modèles sont progressés de concert et sont échangés en utilisant un format de fichier natif, IFC ou Cobie. Cet échange va permettre de combiner tous les modèles en un seul modèle unique ou fédéré. C'est avec ce modèle unique que seront effectuées les détections de conflits par exemple. Le BIM Niveau 2 sera obligatoire pour les projets gouvernementaux en Angleterre en 2016. Partage et diffusion des modèles et plans via Environnement de Données Commun comme pour le niveau 1. A noter que les IFC, même s'ils peuvent être utilisés au niveau 2, ne sont requis qu'à partir du niveau 3. Le BIM niveau 2 + IFC est communément appelé niveau 2i. Le niveau 2 permet l'utilisation du BIM 4D et 5D.

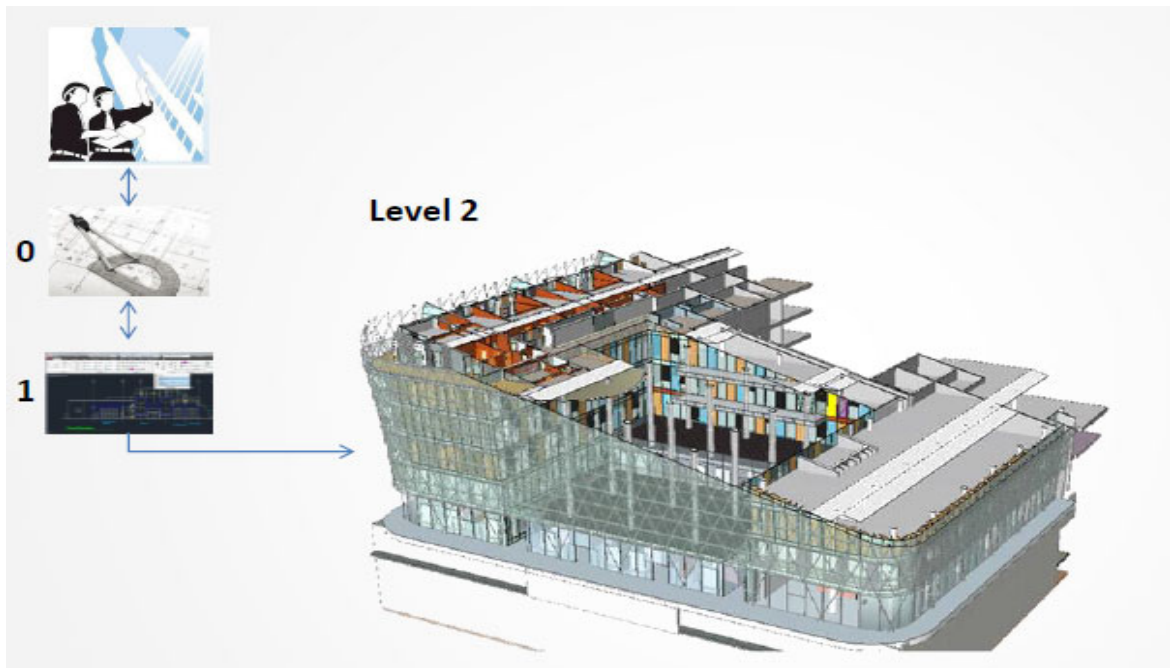


Figure III. 9 Modèle BIM 3D peut être réalisé par logiciel Autodesk Revit, ArchiCAD ou Tekla. Des informations sur les matériaux, les coûts, etc. sont disponibles.

Le BIM niveau 2 contient les éléments suivants:

- Un modèle graphique ou maquette numérique 3D créé avec un logiciel BIM tel Revit, ArchiCAD, Tekla, etc ou un fichier format IFC.
- Des données non-graphiques incluant par exemple des informations importantes pour l'utilisation et la maintenance de l'ouvrage. Au Royaume-Uni le format COBie-UK-2012 a été retenu pour ce type d'information.
- De la documentation comme des rapports ou des dessins 2D. Le format PDF est habituellement recommandé pour cette documentation.

En plus des éléments ci-dessus, le niveau 2 impose les exigences suivantes:

- Structure des données (standards)
- Définition des processus
- Définition et contrôle des échanges de données
- Un Environnement de Données Commun

III.5.4. BIM Niveau 3

Ou iBIM. Considéré par beaucoup comme le seul BIM, car il permet de profiter de tous les avantages offert par le BIM. Un modèle unique est stocké sur un serveur centralisé, accessible par tous les intervenants et durant toute la durée de vie d'un ouvrage via IFC/IFD/IDM. Cette collaboration totale n'est pas sans poser de nombreux problèmes de propriété intellectuelle, de responsabilité et de réglementation de l'accès/modification/enregistrement de la maquette numérique unique. Si pour les autres niveaux les contrats actuels avec un addendum BIM semble suffisant, le Niveau 3 devra recourir à des contrats spécifiques qui régissent ce nouveau type de partenariats entre tous les acteurs. Accords multi-parties, partage des risques et bénéfiques, assurances spécifiques sont également à considérer au niveau 3.

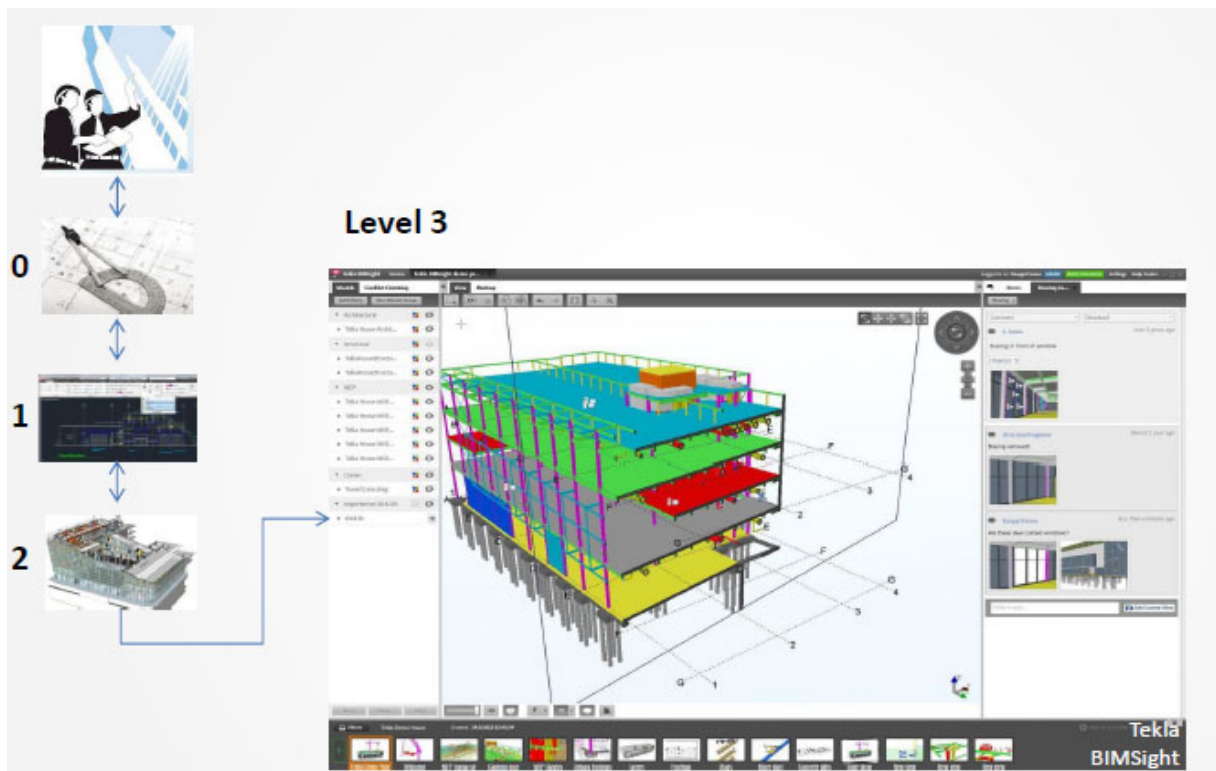


Figure III. 10 Modèle BIM collaboratif, entièrement synchronisé entre tous les partenaires. Fichiers standards (par exemple IFC, COBie).

Le BIM Niveau 3 est actuellement testé sur de grands projets par une minorité de firmes. Ce BIM niveau 3 n'est pas a proprement parlé disponible. La technologie actuelle ne permet pas encore l'accessibilité du Niveau 3 à tous. Les normes et les contrats ne sont pas disponibles et c'est pour cela que les gouvernements se sont arrêtés au Niveau 2 dans leurs exigences.

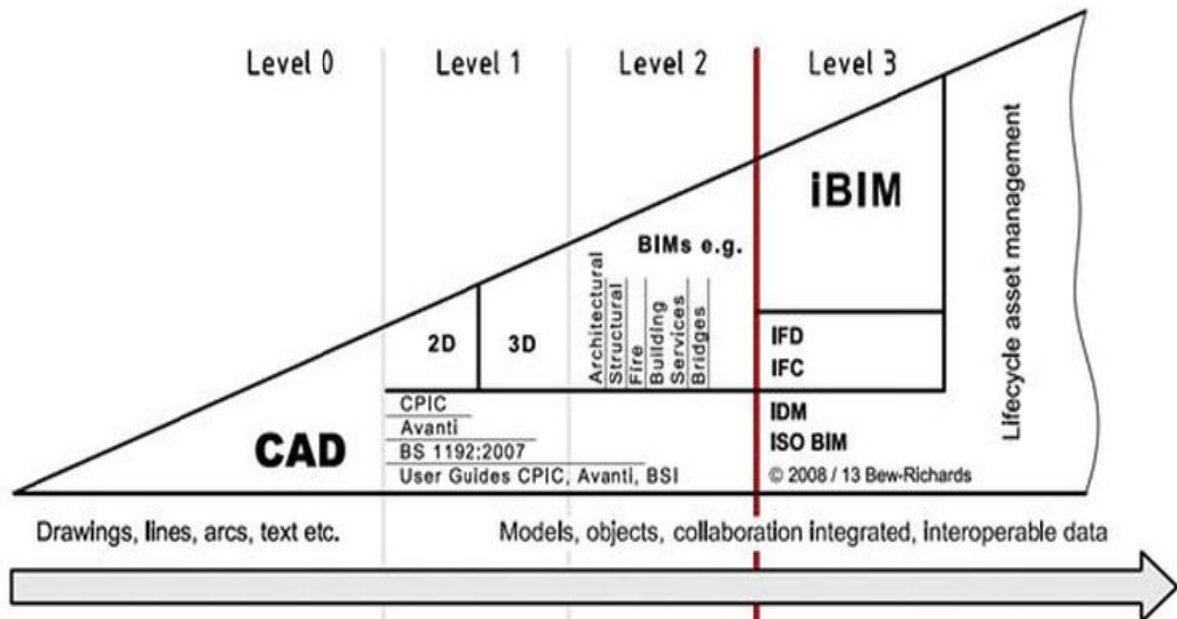


Figure III. 11 Image très connue du diagramme de BEW et Richards qui représente les niveaux du BIM au Royaume-Uni

III.6. Les composantes du BIM

Bien que la modélisation des informations du bâtiment (BIM) ne transforme pas fondamentalement les pratiques des différentes parties prenantes, elle introduit des méthodologies spécifiques qui modifient certaines approches opérationnelles, redistribuent les tâches et offrent de nouvelles perspectives de gestion tout au long de la durée de vie d'un bâtiment. À l'instar de la nature distinctive d'un bâtiment construit, le BIM se caractérise par le caractère unique du fichier informatique qui regroupe toutes les informations générées par les différents acteurs, nécessaires à l'exécution du projet. La représentation tridimensionnelle du dessin, qui permet de se déplacer dans n'importe quelle direction, ainsi que les informations qui définissent tous les objets composant le modèle, reflètent théoriquement le bâtiment qui sera construit.

La création de ce document singulier, partagé par l'équipe de conception du cabinet d'architecture, puis par les différents ingénieurs, évalué par le maître d'ouvrage et approuvé par les entreprises de construction, nécessite que toutes les parties prenantes se familiarisent avec les règles opérationnelles, à la fois méthodologiques et techniques. Bien que le modèle unifié, partagé par toutes les parties prenantes, depuis la création du bâtiment jusqu'à son exploitation, n'incarne pas encore pleinement la réalité du travail collaboratif, il reste

indispensable dans les agences et les bureaux d'études en raison de son identité cohérente et de ses exigences spécifiques

III.7.1 Les ressources naturelles disponibles s'amenuisent

D'ici à 2050, la Terre devrait compter 9 milliards d'habitants. Si nous continuons à utiliser les ressources naturelles de la même façon pour nos infrastructures et bâtiments, il y aura pénurie. Si nous désirons tous vivre à un certain niveau de vie, nous devons trouver des solutions afin de construire différemment et stopper le gaspillage actuel des ressources.

III.7.2 Améliorer l'efficacité et la qualité de l'industrie de la construction

Dernier et non des moindre, le piètre état de notre industrie de la construction. Dépassement de budget, sous-productivité comparée aux autres industries, relation tumultueuse entre les différents acteurs, mauvaise qualité, désorganisation, gaspillage. La construction souffre d'une terrible réputation et il faut bien avouer qu'il est difficile de la défendre tant les problèmes sont nombreux.

Comme précisé dans un rapport du gouvernement anglais, la construction ne doit pas améliorer ses méthodes de travail mais les changer radicalement. Le BIM a de multiples avantages, comme par exemple:

- réduire les modifications tardives de la conception
- détecter les conflits entre les éléments et améliorer la coordination
- réutiliser les informations durant toute la durée de vie d'un projet
- permettre la fabrication hors site
- favoriser l'optimisation de la conception par ordinateur
- enrichir les informations et la visualisation
- permettre l'optimisation de la gestion et des coûts

III.7.3 Les Avantages du BIM

Les avantages de la conception BIM sont multiples, pour tous les intervenants et à toutes les étapes d'un projet. Le BIM change la façon de travailler des maîtres d'ouvrage, architectes, ingénieurs et entrepreneurs. Il leur permet de collaborer et d'ajouter des informations pertinentes très tôt dans le projet, lorsque les modifications n'ont pas encore de conséquences financières graves.

Grâce à la réalisation d'un prototype ou une représentation virtuelle de ce qui va être construit, le BIM permet à un bâtiment d'être construit, testé et analysé en temps réel avant même le premier coup de pioche.

Grâce au BIM, il est possible de réaliser des bâtiments qui consomment moins d'électricité, sont chauffés et climatisés plus efficacement, et protègent mieux leurs occupants.

Répartie en différentes catégories, voici la liste des principaux bénéfices liés à une conception BIM.

Avantages pour les maîtres d'ouvrage et les développeurs

- Durant les études de faisabilité et la conception, l'extraction des quantités du modèle virtuel BIM permet de vérifier très tôt si un projet respectera les critères financiers et les délais de construction.
- Le modèle virtuel 3D aide à la vérification des critères fonctionnels et environnementaux d'un projet. Il en découle une amélioration de la qualité des bâtiments. Cela est primordial quand on sait que l'utilisation d'un bâtiment représente 80% du coût total d'un bâtiment, y compris sa construction.
- Une meilleure collaboration entre les intervenants permet une meilleure compréhension des critères du projet
- Une estimation du coût en temps réel permet de vérifier immédiatement les incidences budgétaires des modifications de conception.

III.7.4 Avantages pour les bureaux d'études, architectes et ingénieurs

- Le modèle virtuel 3D conçu avec un logiciel BIM permet d'effectuer des visualisations précises à toutes les étapes du projet, et est automatiquement consistant dans toutes les vues.
- Le modèle composé d'objets paramétriques ne comportera pas d'erreur de géométrie, notamment suite à une modification.
- Les logiciels BIM permettent à tout instant de générer des plans 2D, consistants entre eux, qui reflètent parfaitement le modèle virtuel à cet instant.
- La collaboration entre les intervenants est facilitée grâce à l'utilisation d'un même modèle 3D, simultanément ou non.
- Le modèle virtuel BIM permet la vérification du respect des normes en vigueur et des critères du projet tant au niveau quantitatif que qualitatif.

- Les quantités et coûts de construction peuvent être extraits en temps réel, à tout moment durant la conception. Cela permet d'avoir un retour immédiat sur les conséquences budgétaires d'une modification ou d'une variante.
- Les analyses et simulations des performances énergétiques et environnementales d'un bâtiment peuvent être réalisées très tôt dans l'étude, ce qui fournit l'opportunité de corriger la conception au besoin.

III.7.5 Avantages lors de la construction et la fabrication, entrepreneurs et fabricants

- Le modèle 3D est la source de tous les dessins, ce qui permet donc d'éliminer toutes inconsistances entre eux.
- Découverte des erreurs et omissions avant le début des travaux. Les modèles provenant de toutes les disciplines peuvent être assemblés et vérifiés pour les éventuelles interférences. Les conflits et autres problèmes de construction sont visualisés au stade des études et non sur le chantier.
- Grâce aux objets paramétriques du modèle virtuel, les modifications seront reportées en temps réel et leurs conséquences peuvent être visualisées.
- La conception et la construction peuvent être synchronisées grâce au 4D, qui ajoute la dimension temps au modèle virtuel 3D.
- Le modèle 3D permet l'extraction de tous les matériaux et ressources nécessaires à chaque étape du projet. Il est beaucoup plus facile de planifier les livraisons des matériaux et des équipements. Les commandes aux sous-traitants peuvent être effectuées avec plus de précision et en temps opportun.
- Le modèle 3D permet une plus grande précision de fabrication.

III.7.6 Avantages post construction pour les propriétaires et la gestion de patrimoine

- Toutes les informations collectées durant la construction peuvent être insérées dans le modèle 3D et remises aux propriétaires.
- Le modèle 3D remis est une source d'informations indispensables pour la gestion et l'opération des installations, ainsi que lors des travaux d'entretien.

Chapitre IV

La Productivité de Travail

IV.1.Introduction :

L'industrie de la construction est un secteur économique vital qui contribue de manière substantielle au progrès et à la prospérité des nations. Compte tenu de la demande croissante d'infrastructures et de projets de construction, il est impératif d'optimiser l'efficacité et la productivité sur les chantiers de construction afin de garantir l'atteinte d'une qualité élevée et le respect des délais des projets.

Ces sites de construction sont confrontés à une myriade de défis, notamment en matière d'organisation opérationnelle, de gestion des ressources, de techniques de construction contemporaines et de sécurité des travailleurs. Progresser et exceller dans ce domaine nécessite la mise en œuvre de stratégies efficaces pour améliorer l'efficacité et la productivité tout en surmontant les obstacles liés au flux de travail.

Nous étudions une gamme de stratégies qui peuvent faciliter l'optimisation des performances des chantiers de construction et l'obtention de meilleurs résultats. Nous étudions les détails de l'amélioration de la planification des projets, de la gestion efficace des ressources, de l'utilisation de technologies de pointe et d'innovations dans le processus de construction, ainsi que de l'amélioration de la communication et de la coordination entre toutes les parties impliquées, ce qui peut contribuer à la réalisation de projets plus efficaces, de meilleure qualité et plus rentables

La productivité du travail dans les projets de réhabilitation des bâtiments est une préoccupation majeure dans le secteur de la construction. Des facteurs tels que la complexité de la conception, la composition inefficace de l'équipage, les informations de conception manquantes et le manque d'expertise des sous-traitants peuvent avoir un impact négatif sur la productivité du travail [58]. Il a été démontré que des systèmes de renforcement simples, tels que le « Good Productivity Game », améliorent le rendement du travail dans les établissements de réadaptation [59]. Cependant, les travaux de réhabilitation sont confrontés à des défis en raison du gaspillage, des conditions sociales et des obstacles réglementaires, qui peuvent augmenter les coûts des projets et réduire la rentabilité [60]. La capacité de production des projets de réhabilitation est influencée par des facteurs tels que les ressources de livraison des matériaux, l'épaisseur de la couche et les méthodes de construction [61]. Dans le domaine de la psychiatrie, des initiatives de productivité au travail ont été développées pour

les maladies mentales graves, mais l'attention portée à la productivité au travail dans les troubles affectifs est relativement récente [60]. Dans l'ensemble, la prise en compte de la productivité du travail dans le cadre de la réhabilitation des bâtiments nécessite d'identifier les facteurs critiques, de mettre en œuvre des systèmes de renforcement, de surmonter les obstacles et d'intégrer les initiatives de productivité au travail dans des programmes complets de gestion des pathologies.

L'étude de la production dans le secteur de la construction représente un défi considérable. Tout d'abord, ce domaine englobe un nombre important d'entreprises artisanales qui, comme nous le savons, sont intrinsèquement complexes à comprendre. Deuxièmement, les projets d'infrastructure, tels que la construction de bâtiments, présentent par nature une dispersion géographique, et les sites de construction sont fondamentalement éphémères par nature. De plus, les « produits » obtenus grâce à ces efforts présentent une immense diversité, leur composition fluctuant considérablement au fur et à mesure de l'évolution des méthodologies de construction. De plus, la durée des travaux sur site dépasse souvent la date limite prévue, s'étendant parfois sur plusieurs années et les coûts augmentant aussi. Dans ce chapitre nous abordons la notion de production, la productivité dans le secteur de l'industrie du bâtiment, leurs mesurage, les facteurs influant sur la productivité et la productivité par l'intégration du BIM.

IV.2. Définition de la production:

Le concept de productivité a fait l'objet de nombreuses discussions dans divers écrits. Bien que ce concept ait une longue histoire, son importance et ses diverses applications n'ont attiré l'attention que récemment. Dans sa formulation originale, le concept de productivité fait partie du langage courant, perdant son essence d'origine et fusionnant avec des catégories similaires telles que la production, le rendement, l'efficacité, la rentabilité, etc. Cette ambiguïté inhérente au concept permet de multiples interprétations et formulations, notamment la productivité partielle, la productivité globale, la productivité du travail et la productivité du capital. Une telle multitude de définitions et de formules, quel que soit leur contexte théorique, risque d'exacerber la confusion et l'ambiguïté qui entourent le concept de productivité[6].

La productivité est considérée comme le fondement de la création de richesse. Tout au long du développement de la science économique, les économistes se sont attachés à définir

l'étendue de la production. Le concept de productivité, étroitement lié à la production, a été abordé différemment dans la théorie économique. Par conséquent, diverses théories ont émergé pour expliquer les causes de la productivité et son potentiel de croissance. Ces théories se contredisent souvent et s'excluent mutuellement dans le domaine des sciences économiques.

L'étude de la productivité au sein de l'économie politique a donné lieu à de nombreux discours économiques, notamment en relation avec l'évolution du capitalisme, en particulier pendant sa phase industrielle. Par conséquent, notre examen de la productivité s'appuiera sur les outils analytiques fournis par trois grandes écoles économiques qui ont influencé de manière significative l'histoire de la pensée économique : l'école classique, l'école marxiste et l'école néoclassique.

Dans l'approche classique, nous nous concentrerons sur les travaux de A. Smith, qui explorent en profondeur la division du travail et son impact sur l'augmentation de la productivité et de la richesse nationale. L'analyse de Marx du développement des forces productives dans le capitalisme, basée sur l'évolution historique des différents processus de travail au sein des sociétés salariales capitalistes, sera également prise en compte. Marx souligne le rôle crucial de la productivité du travail en tant qu'indicateur clé de l'évolution du capitalisme industriel. Enfin, nous discuterons de l'introduction de la fonction de production par les auteurs néoclassiques, qui explique l'efficacité de la combinaison de facteurs de production tels que le capital et le travail.

IV.2.1. La productivité partielle:

La productivité partielle est définie comme le ratio de production obtenu grâce à l'utilisation d'un facteur de production spécifique. Cela est particulièrement vrai lorsqu'il s'agit de la productivité du travail, qui est le résultat de l'utilisation d'un seul facteur : le travail. En termes analytiques, la productivité du travail peut être exprimée comme la production réalisée divisée par le facteur travail. De même, la productivité du capital peut être définie comme la production réalisée divisée par le facteur capital. Le rapport présenté ici met l'accent sur un coefficient de production. Néanmoins, la productivité englobe non seulement l'achèvement d'un rapport de production, mais implique également une traduction significative et une relation de cause à effet entre la production et le facteur spécifique considéré. La production partielle devrait résulter exclusivement de l'influence du facteur en question, tandis que la productivité d'un facteur particulier peut fluctuer en raison de l'impact d'un autre facteur. La

production moderne nécessite l'incorporation d'une multitude de facteurs, attribuant diverses variations de production à une combinaison de facteurs plutôt qu'à un seul facteur exclusivement. C'est précisément pourquoi les analystes de productivité utilisent le concept de « productivité apparente du travail » pour désigner la productivité du travail.

IV.2.2. La productivité globale des facteurs « P.G.F »

La pratique dominante est apparue pour désigner le ratio de production, qui englobe la main-d'œuvre, le capital, les matières premières et d'autres éléments, comme étant la productivité mondiale. Cependant, d'autres facteurs peuvent également influencer cette productivité, tels que les ressources naturelles, le progrès technique, la technologie et l'organisation du travail. Il convient de noter que la productivité globale n'est pas globale, car elle ne tient pas compte de certains facteurs, notamment qualitatifs.

Dans le cadre global de la productivité, il s'avère difficile de déterminer la proportion attribuée à la variation de la production résultant des différents facteurs utilisés, notamment par rapport à leurs quantités respectives. La question de leur contribution au processus de production n'est toujours pas résolue, ce qui pose des difficultés pour établir un concept global de productivité.

Cela constitue le principal obstacle. Comment mesurer la part attribuable au travail et la part attribuable à d'autres facteurs, notamment au capital ? La productivité mondiale n'est pas une simple moyenne des productivités, mais plutôt une moyenne pondérée. Par conséquent, la détermination des coefficients de pondération devient cruciale afin de déterminer l'importance et la contribution de chaque facteur spécifique.

Il ne fait aucun doute que les économistes, en particulier les néoclassiques, utilisent la fonction de production pour mesurer les contributions respectives du capital et du travail. Cette fonction représente la relation mathématique entre la quantité produite et la quantité du facteur utilisé. La « P.G.F » (Productive Gain Function) apparaît comme la mesure la plus complète de la productivité, car elle établit un lien entre la production réalisée et tous les facteurs de production employés.

IV.3. La mesure de la productivité du travail

La mesure de la productivité du travail dans les projets de réhabilitation des bâtiments est une préoccupation majeure dans le secteur de la construction. Divers facteurs influent sur la productivité du travail dans ces projets, notamment la complexité de la conception, la composition de l'équipe, les informations de conception manquantes, l'expertise des sous-traitants, la distance de stockage des matériaux, l'expérience des travailleurs, la congestion du site et la dégradation des matériaux et de l'équipement [63]. Dans les projets de construction de routes en Indonésie, il a été démontré que des facteurs tels que les conditions sur le terrain, le temps, les facteurs financiers et la main-d'œuvre interne affectaient la productivité du travail [64]. L'attribution de poids aux facteurs influant sur la productivité peut contribuer à améliorer la productivité des projets de construction. Une étude menée à Pune, en Inde, a identifié douze facteurs affectant la productivité, qui ont ensuite été analysés à l'aide de la méthode Delphi [65]. La productivité du travail dans le secteur de la construction est également cruciale pour atteindre les objectifs de durabilité, tels que la réduction des émissions de carbone. L'adoption d'outils et de méthodes Lean a le potentiel d'améliorer la productivité de la main-d'œuvre dans le secteur de la construction et d'économiser de l'énergie et des émissions dans les projets de rénovation [66]. Cependant, les méthodes actuelles de mesure de la productivité dans le secteur de la construction ne sont pas satisfaisantes, et les systèmes de certification des bâtiments existants ne tiennent pas suffisamment compte de la durabilité globale du processus de rénovation [69].

IV.4. Allocation et gestion efficaces des ressources

L'amélioration de la productivité sur un chantier de construction repose en grande partie sur une gestion efficace des ressources. Ce processus implique une planification stratégique et une supervision des travailleurs, des équipements, des matériaux et du temps. En affinant l'allocation des ressources et en les utilisant efficacement, les entreprises de construction peuvent éviter le gaspillage, réduire les temps d'arrêt inutiles et, en fin de compte, accélérer les calendriers des projets.

Tout d'abord, le travail d'équipe est un pilier essentiel de tout projet de construction. Les travailleurs possédant les compétences adéquates doivent être affectés aux tâches qu'ils maîtrisent, ce qui permet d'améliorer la qualité du travail et d'accroître l'efficacité avec laquelle les tâches sont accomplies. La planification des horaires de travail est également essentielle : des facteurs tels que les équipes, les pauses et les heures supplémentaires doivent

être pris en compte afin de maintenir le moral des travailleurs et d'éviter une fatigue excessive.

Deuxièmement, les équipements et les machines doivent être gérés efficacement pour obtenir des performances optimales et donc maximisées. Il convient donc d'organiser une maintenance régulière pour garantir des performances optimales et éviter les temps d'arrêt imprévus dus à une défaillance de l'équipement. En outre, la mise en œuvre d'un système de suivi des stocks peut s'avérer utile pour contrôler le flux de matériaux et éviter les pénuries et les dépassements, deux facteurs qui peuvent avoir un impact négatif sur les calendriers et les coûts du projet.

Enfin, la gestion du calendrier du projet est essentielle pour optimiser le travail sur le chantier et augmenter la productivité, car une planification rigoureuse permet de mener à bien le projet et d'éviter les arrêts de travail, ce qui permet d'achever et de livrer la construction dans les délais prévus. En utilisant ces stratégies et en les appliquant de manière intégrée, les entreprises de construction peuvent obtenir une augmentation notable de la productivité sur les chantiers.

IV.5. Construction allégée

Fondamentaux pour réaliser des gains d'efficacité sur les chantiers, les principes de la construction allégée visent à optimiser les processus de planification, d'exécution et de gestion de projet, à promouvoir la durabilité et à réduire les déchets, ce qui se traduit par une augmentation de la productivité et une amélioration des résultats du projet. Voici comment les principes de la construction allégée peuvent améliorer l'efficacité sur un chantier de construction :

Améliorer la planification et l'organisation : Le Lean encourage l'élaboration de plans complets et précis qui englobent tous les aspects du projet. Cela permet de définir clairement les objectifs et d'allouer efficacement les ressources, de réduire le stress et les conflits et d'améliorer la fluidité du travail. Utilisation efficace des ressources : L'optimisation de l'affectation des matériaux, de la main-d'œuvre et des équipements permet de réduire les déchets. Cela a un impact positif sur le coût global du projet et contribue à un meilleur retour sur investissement.

Optimiser les horaires de travail et la productivité : En créant des calendriers de travail serrés et cohérents, il est possible d'éviter les temps d'arrêt et les retards inutiles. L'application des principes Lean permet d'améliorer l'enchaînement des activités et d'accroître la productivité. Améliorer la qualité et minimiser les erreurs : Le Lean se concentre sur l'obtention de la qualité par le biais d'un contrôle continu et de l'amélioration des processus. Cela permet de minimiser les erreurs et les problèmes susceptibles d'avoir un impact négatif sur la qualité et le calendrier.

Promouvoir la communication et la collaboration : Une bonne communication et une collaboration soutenue entre les différentes équipes sur un chantier de construction permettent de mieux coordonner les activités et d'éviter les chevauchements et les conflits. Cela permet d'améliorer l'efficacité du travail et de minimiser les risques de pertes inutiles.

Utiliser des technologies de pointe : Les principes de l'allègement encouragent l'utilisation de techniques et d'outils de construction modernes, tels que les systèmes de gestion de projet et les technologies de l'information. Cela accroît l'efficacité de la gestion et contribue à améliorer l'efficience.

Améliorer la satisfaction des clients : En répondant précisément aux besoins et aux attentes des clients conformément aux spécifications requises, la satisfaction des clients peut être améliorée et les opportunités commerciales futures peuvent être maximisées.

En appliquant les principes Lean dans la construction, les entreprises de construction peuvent éliminer les activités sans valeur ajoutée telles que la paperasserie et les réunions inutiles et améliorer considérablement l'efficacité de la production sur les chantiers, ce qui se répercute positivement sur les résultats finaux des projets.

IV.6. Technologies numériques pour la construction

L'avènement des technologies numériques a radicalement transformé le secteur de la construction, ouvrant de nouvelles possibilités d'amélioration de la productivité et d'optimisation des processus de construction. Les technologies numériques de construction sont reconnues pour leur capacité à transformer les processus traditionnels en processus plus intégrés et plus efficaces, offrant des expériences interactives qui améliorent la qualité des projets et réduisent les coûts. Voici quelques-unes de ces technologies

IV.6.1. Les logiciels de gestion de la construction

Les logiciels de gestion de la construction sont des outils essentiels pour améliorer l'efficacité et la réussite des chantiers. Des logiciels tels que PlanRadar simplifient et rationalisent les processus de gestion et d'exécution, ce qui permet d'accroître la productivité et d'améliorer la réalisation des projets. Voici comment les logiciels de gestion de la construction peuvent nous aider :

Faciliter la planification et le suivi : Ces programmes offrent des interfaces basées sur le cloud qui rassemblent les informations et les données relatives au projet en un seul endroit. Cela facilite la visibilité et la communication au sein de l'équipe, car chacun peut connaître l'état d'avancement du projet et les développements en temps réel.

Favoriser la communication et la collaboration : Ces programmes fournissent des plateformes interactives qui permettent à toutes les parties prenantes de partager des informations et de communiquer efficacement. Les commentaires peuvent être faits et les documents peuvent être partagés facilement, ce qui renforce l'interaction entre les équipes et minimise la confusion.

Améliorer la transparence et la précision : En rassemblant toutes les informations et données sur une plateforme unique, il est possible d'obtenir une vue claire et complète de l'état d'avancement du projet. Cela réduit les risques de malentendus et de conflits entre les équipes et accroît la transparence.

Automatiser les tâches de routine : ces programmes améliorent l'efficacité en automatisant de nombreuses tâches de routine, telles que l'identification des problèmes et l'alerte des équipes sur les défis actuels. Cela permet d'orienter les efforts vers une résolution rapide et efficace des problèmes.

Amélioration de la planification et de la gestion du calendrier : Les logiciels de gestion de la construction permettent d'améliorer la planification et la gestion du calendrier des projets. L'avancement du projet peut être facilement suivi et les mises à jour nécessaires peuvent être appelées instantanément.

Fournir des analyses avancées : Grâce à l'agrégation des données, ces logiciels peuvent fournir des analyses détaillées sur les performances du projet et identifier les goulets d'étranglement potentiels. Cela permet de prendre des décisions plus ciblées et plus précises.

Les logiciels de gestion de la construction permettent aux entreprises d'optimiser leurs opérations, d'accroître leur productivité et d'améliorer l'efficacité des chantiers. Ces outils sont l'un des éléments clés pour mener à bien des projets de construction de manière efficace et organisée.

IV.6.2. Modélisation des données du bâtiment (BIM)

La modélisation des données du bâtiment (BIM) est une technologie numérique avancée très efficace dans le secteur de la construction. La BIM permet de créer une visualisation précise d'un projet, de découvrir les intersections et de réaliser une planification collaborative. Le logiciel BIM peut générer des modèles 3D détaillés d'un projet, incorporant des informations complètes qui optimisent tous les aspects du bâtiment et des systèmes connexes. Ce niveau de détail avancé permet d'identifier les interférences et les conflits potentiels avant le début de la construction, ce qui minimise efficacement les travaux de reprise et réduit le coût des retards.

Grâce à la BIM, les équipes de construction peuvent améliorer la coordination entre les différentes disciplines, de l'architecture à l'ingénierie structurelle et à la construction. En améliorant la coordination, les équipes peuvent rationaliser le flux de travail, minimiser le risque d'erreurs et augmenter la productivité globale. Les logiciels de gestion de la construction tels que PlanRadar s'intègrent parfaitement à la technologie BIM, ce qui permet aux utilisateurs de maximiser les avantages des technologies numériques de la construction et d'améliorer l'efficacité de la gestion de projet.

IV.6.3. Impression 3D

La technologie de l'impression 3D est une autre option qui peut améliorer de manière significative la productivité dans la construction. L'impression 3D, également connue sous le nom de fabrication additive, permet de fabriquer avec précision des composants et des structures à partir de modèles numériques. Cette technologie élimine la nécessité de recourir aux processus de fabrication traditionnels, réduisant ainsi les délais et les coûts liés à la production de pièces complexes ou personnalisées.

En exploitant les avantages de l'impression 3D, les équipes de construction peuvent optimiser la production de composants structurels, en réduisant les déchets et en améliorant la productivité globale. Par exemple, les moules imprimés en 3D peuvent être utilisés pour créer

des structures en béton complexes et personnalisées, éliminant ainsi le besoin de moules traditionnels, qui sont souvent coûteux et chronophages.

En utilisant la technologie de l'impression 3D, le secteur de la construction peut améliorer radicalement ses opérations en réduisant le temps et les ressources consacrés à la production et à la fabrication, ce qui accroît l'efficacité et améliore les résultats des projets.

IV.6.4. Le jumeau numérique du chantier de construction

Le concept de jumeau numérique est devenu un sujet d'actualité ces dernières années, car il permet d'atteindre des niveaux précis de simulation numérique d'objets et de systèmes réels. Dans le secteur de la construction, les jumeaux numériques créent des modèles virtuels de sites réels, couvrant une gamme complète d'aspects physiques, tels que le terrain, les élévations, l'infrastructure et les matériaux de construction.

Avec un jumeau numérique d'un chantier de construction, les ingénieurs et les entrepreneurs sont en mesure d'identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne surviennent. Ils peuvent ainsi prendre des décisions éclairées sur la base de données précises, ce qui permet d'optimiser les processus de construction et de stimuler la productivité globale. Grâce aux jumeaux numériques, il est possible d'apporter des améliorations fondées sur des preuves solides, de minimiser les erreurs et les coûts, d'améliorer ainsi la qualité des projets et de maximiser le retour sur investissement.

IV.6.5. L'internet des objets (IoT)

L'internet des objets (IoT) est un système en réseau d'appareils connectés qui collectent et échangent des données. Dans le secteur de la construction, les appareils IoT jouent un rôle essentiel en surveillant les conditions du chantier, en suivant les performances des équipements et en fournissant des données précises en temps réel pour prendre des décisions éclairées. Les technologies IoT permettent aux équipes de construction d'avoir une vision globale des conditions du site, de l'efficacité de l'utilisation des équipements et de la sécurité au travail. Par exemple, les capteurs IoT sur les équipements de construction sont utilisés pour surveiller l'utilisation, les besoins de maintenance et les performances des équipements. Ces données permettent d'identifier les tendances, d'optimiser l'utilisation des équipements et de traiter rapidement les problèmes de maintenance, ce qui se traduit par une amélioration de la productivité.

En outre, les dispositifs IoT surveillent les conditions du site, telles que la température, l'humidité et la qualité de l'air. Ce contrôle permet aux équipes de construction d'identifier les dangers potentiels et de prendre des mesures préventives pour garantir un environnement de travail sûr. Les technologies IoT bénéficient d'une meilleure productivité et d'une sécurité accrue sur les chantiers de construction, contribuant ainsi à une exécution plus efficace et de meilleure qualité des projets.

IV.6.6. Planification des projets

Une planification efficace des projets est cruciale lorsqu'il s'agit de maintenir la productivité sur les chantiers de construction. En coordonnant étroitement la gestion du temps, en allouant intelligemment les ressources et en coordonnant la collaboration entre toutes les parties prenantes, il est possible de garantir la rationalisation des opérations et l'achèvement du projet. Des outils tels que les diagrammes de Gantt et l'analyse du chemin critique permettent de visualiser les calendriers des projets, d'identifier les dépendances et de mettre en œuvre des stratégies pour atténuer les retards potentiels.

Les logiciels de gestion de projets de construction fournissent aux équipes de nombreux outils pour planifier les projets et intégrer les diagrammes de Gantt, ce qui leur permet de créer et de gérer des calendriers détaillés. Grâce à cette approche globale, le projet progresse en douceur, les distractions sont réduites au minimum et la productivité est stimulée.

En contrôlant et en suivant systématiquement chaque étape d'un projet de construction, les professionnels peuvent prendre des décisions éclairées, allouer les ressources de manière efficace et fournir des résultats de haute qualité dans les délais impartis. L'adoption de cette approche systématique contribue à la réussite du projet et à la réalisation effective de ses objectifs.

IV.6.7. Amélioration de la communication

L'utilisation d'un logiciel de gestion de projet tel que PlanRadar peut jouer un rôle important dans l'amélioration de la communication et de la collaboration en fournissant une plateforme centralisée pour faciliter le partage d'informations et rationaliser la gestion des tâches. Cette approche intégrée permet non seulement de minimiser les erreurs, mais aussi d'améliorer la coordination et d'augmenter la productivité, ce qui permet aux équipes de construction de livrer des projets de la qualité requise et dans les délais impartis.

L'équipe de construction peut utiliser les caractéristiques et les fonctionnalités avancées de PlanRadar pour faciliter une communication efficace tout au long du cycle de vie du projet. De la planification initiale à l'achèvement et à la remise des clés, le logiciel garantit que toutes les parties prenantes sont sur la même longueur d'onde, ce qui améliore considérablement les résultats du projet.

IV.6.8. Contrôle de la qualité et gestion des risques

Le contrôle de la qualité et la gestion des risques sont des aspects essentiels pour garantir une productivité optimale et réaliser des projets qui dépassent les attentes des clients. L'importance du contrôle de la qualité réside dans l'exécution de procédures d'inspection approfondies, l'identification précise des problèmes potentiels et l'application de mesures correctives immédiates pour maintenir la qualité du projet.

Améliorer la qualité : La mise en œuvre du contrôle de la qualité permet de s'assurer que tous les aspects du projet répondent aux normes établies et continuent à fonctionner au plus haut niveau possible. Cela minimise l'apparition d'erreurs et de défauts dans le projet, ce qui réduit la nécessité de retravailler et d'apporter des corrections ultérieures, ce qui est une perte de temps et de ressources.

Réduire les coûts : La gestion des risques permet d'identifier les problèmes potentiels et les possibilités d'amélioration avant qu'ils ne se produisent. Des mesures correctives peuvent être prises à un stade précoce pour éviter les coûts supplémentaires qui pourraient résulter de problèmes non résolus.

Améliorer la coordination et la collaboration : En identifiant et en traitant les risques potentiels, la coordination entre les différentes équipes est renforcée et la collaboration est améliorée. Cela permet de minimiser les perturbations et les conflits qui peuvent avoir un impact négatif sur l'avancement du projet.

Minimiser les retards : En examinant et en traitant rapidement les problèmes potentiels, il est possible d'éviter les retards imprévus susceptibles d'affecter le calendrier du projet. Cela contribue au bon déroulement du projet et au respect des délais.

Augmentation de la satisfaction des clients : La qualité du projet et le respect des délais contribuent à accroître la satisfaction du client. Si un projet est livré avec des normes de

qualité élevées et sans retard, les clients apprécieront davantage l'entreprise et multiplieront les opportunités commerciales futures.

Optimisation des ressources : En examinant les aspects potentiels du risque, y compris les attentes en matière de main-d'œuvre, d'environnement et de matériaux, il est possible de mieux répartir les ressources. Cela permet d'optimiser l'utilisation des ressources et d'éviter de les gaspiller dans des domaines inutiles.

En résumé, le contrôle de la qualité et la gestion des risques favorisent l'organisation et l'efficacité et contribuent à améliorer les performances et les résultats des projets dans le secteur de la construction.

IV.6.9. Formation et développement de la main-d'œuvre

Investir dans la formation et le développement de la main-d'œuvre est essentiel pour stimuler la productivité sur les chantiers de construction. En s'assurant que les travailleurs possèdent les compétences et les connaissances adéquates, les entreprises de construction peuvent améliorer leur productivité de manière significative. Les programmes de formation ne doivent pas se concentrer uniquement sur les compétences techniques, mais aussi sur les protocoles de sécurité, les applications des nouvelles technologies et une communication efficace.

À cette fin, la formation peut contribuer à améliorer la compréhension par les travailleurs des technologies innovantes dans la construction, telles que les jumeaux numériques et l'internet des objets. Elle contribue également à améliorer l'efficacité et la précision dans l'exécution des tâches et à éviter les erreurs, augmentant ainsi la productivité. En outre, la formation continue encourage la pensée créative et les solutions aux défis qui peuvent survenir au cours de l'exécution des projets. Par conséquent, les travailleurs peuvent contribuer activement à l'amélioration des processus et réaliser des améliorations continues.

En outre, la formation peut favoriser la sensibilisation aux règles de sécurité et aux mesures préventives, minimisant ainsi les accidents du travail et assurant la sécurité des travailleurs et le bon déroulement de la production. Les coûts liés aux retards et aux perturbations pouvant résulter d'accidents peuvent ainsi être évités.

La formation et le développement de la main-d'œuvre sont des éléments essentiels pour améliorer la productivité sur les chantiers de construction. Elles permettent de développer les

compétences et les connaissances, d'améliorer la compréhension des nouvelles technologies, de renforcer la sécurité et d'encourager l'innovation, ce qui conduit à des améliorations significatives des performances, de la qualité et de l'efficacité au fil du temps.

IV.7. Conclusion:

En tant qu'industrie vitale et critique, le secteur de la construction et de la réhabilitation vise l'excellence à chaque étape du cycle de vie de la construction. Pour atteindre cet objectif, nous devons adopter une culture d'amélioration continue et de développement durable, où l'innovation et l'apprentissage par l'expérience sont essentiels. L'investissement dans les technologies de l'information, la formation continue du personnel et le développement des processus de gestion et de contrôle nous permettront d'optimiser les performances des projets et d'atteindre nos objectifs.

Atteindre l'efficacité et la productivité sur les chantiers de construction et de la réhabilitation n'est pas seulement un objectif, c'est un défi permanent qui exige des efforts continus et des stratégies efficaces. En mettant en œuvre ces stratégies, qui comprennent une planification minutieuse, une communication efficace, l'utilisation de technologies modernes telles que les logiciels de gestion de la construction, une gestion optimale des ressources, un contrôle de la qualité et un développement continu de la main-d'œuvre, nous pouvons constater une nette amélioration de la performance des chantiers de construction et obtenir de meilleurs résultats.

Chapitre V

Développement et Analyse

V.1. Introduction :

Il est largement reconnu depuis longtemps qu'à peine 20 % du contenu du devis des quantités représentent 80 % de sa valeur globale. Les articles du devis des quantités qui ont une valeur sont limités à 20 % seulement (Ashworth et Skitmore, 1983 ; Thompson, 1981). De plus en plus de preuves suggèrent qu'en se concentrant sur la petite fraction des éléments considérés comme « importants en termes de coûts » et responsables de la majorité des dépenses, il est possible d'améliorer l'estimation, l'efficacité et la précision (Bennett, 1983 ; Harmer, 1983 ; Morrison, 1984). Des recherches récentes ont démontré l'application du principe 80/20 dans le développement de méthodes nouvelles et non conventionnelles pour estimer et contrôler le coût des projets de construction. Cette recherche a permis de constater que les éléments de facturation dont la valeur est supérieure à la moyenne contribuent régulièrement à 80 % de la valeur du projet alors qu'ils ne représentent que 20 % du nombre total (Shereef, 1981). Cette découverte a ouvert la voie au développement de deux techniques cruciales : l'estimation itérative, qui permet de prédire des estimations quantitatives avec une précision de 65 %, sans nécessiter la détermination du prix de plus de 30 % des articles, et les modèles de signature des coûts, qui servent d'outils pour estimer et contrôler les projets de construction, tout en facilitant la prise de décisions. Ces modèles ne contiennent toutefois que 10 ± 20 % des éléments trouvés dans une estimation conventionnelle (Saket et al. 1986). Les modèles de coûts ont été conçus en classant les projets de manière à prendre en compte les éléments importants du processus d'estimation en termes de coûts. En d'autres termes, ces modèles garantissent que les éléments importants en termes de coûts sont systématiquement pris en compte dans l'estimation des coûts de toutes les estimations quantitatives au sein d'une même catégorie de projet. En utilisant les techniques décrites dans ce document, il est possible de regrouper les éléments ayant un impact significatif sur les coûts en lots de travaux qui constituent une proportion substantielle (près de 80 %) de la valeur totale du projet dans la même catégorie de projet. Cette proportion, connue sous le nom de facteur de modélisation

des coûts, représente le ratio entre la valeur des lots de travaux à haute valeur ajoutée et la valeur totale du projet.

La détermination de la valeur totale d'un projet peut être réalisée en fixant le prix des lots de travaux dont les coûts sont importants et en appliquant un facteur de modélisation des

coûts approprié. Ce facteur prend en compte à la fois les coûts et l'efficacité du projet. En outre, le facteur de modélisation des coûts approprié prend également en compte la valeur des éléments qui ne sont pas comptabilisés en termes de coûts et la valeur des lots de travaux qui ne sont pas significatifs en termes de coûts (Asif et Horner, 1989).

La progression naturelle de cette recherche visait à déterminer si les nouveaux modèles pouvaient être utilisés pour estimer et gérer la durée et les coûts des projets. Il semblait possible d'établir un lien entre le coût et la quantité de tout module de travail au moyen de tarifs. Par conséquent, un examen approfondi des quantités et des taux figurant sur les bordereaux de quantité et les devis a été effectué. Les résultats de cette analyse ont conduit au développement d'un modèle intégré des coûts et des délais pour les ponts en béton armé, qui a été discuté dans un autre rapport (Horner et Zakieh, 1993).

Des études récentes ont indiqué aussi qu'il est possible d'identifier un nombre limité de lots de travaux entraînant des coûts importants dans n'importe quelle catégorie de projet. Ces lots de travail représentent une part importante et restent constants en termes de valeur globale de la facture. En utilisant le principe de la signification des quantités, il a été possible de construire des modèles simples capables de prévoir à la fois le coût et la durée d'un projet. Remarquablement. Ce chapitre présente un aperçu du contexte et des implications de la méthode de Pareto (20/80) dans les projets de réhabilitation. Les ensembles de travaux significatifs en termes de quantité sont formés en agrégeant les éléments d'une transaction, où une analyse de régression linéaire de la valeur par rapport à la quantité donne un coefficient de corrélation supérieur à 0,99 et une intersection qui n'est pas significativement différente de zéro. Le coût des forfaits créés de cette manière peut être déterminé en appliquant simplement le taux associé à la plus grande quantité à tous les articles du devis, appelé « article caractéristique ». L'application des concepts d'importance des quantités et d'éléments caractéristiques devrait permettre de simplifier les estimations et d'améliorer l'efficacité des procédures de vérification, car il n'est plus nécessaire d'affecter les coûts et les moyen de chaque élément à part contribuant à un lot de travaux.

V.2. La loi de Pareto (méthode 80-20):

La loi de Pareto, formulée par Vilfredo Pareto, un économiste italien, postule que la majorité des résultats, précisément 80 %, découlent d'une simple fraction, environ 20 %, des

facteurs qui contribuent à ces résultats. En termes plus simples, une proportion relativement faible des causes accélère un impact disproportionné. Ce principe, devenu un principe indispensable dans diverses disciplines, notamment l'économie, la gestion et la prise de décisions, peut être utilisé efficacement pour identifier et hiérarchiser les initiatives qui revêtent la plus grande importance et la plus grande valeur pour une organisation ou une entreprise, incarnant ainsi la quintessence du sens stratégique. La loi de Pareto repose essentiellement sur une compréhension approfondie du rôle central joué par quelques facteurs critiques sélectionnés dans l'obtention de résultats globaux, ainsi que sur la nécessité d'allouer les ressources et l'attention de manière judicieuse pour optimiser les résultats, illustrant ainsi l'essence de l'efficacité et de l'efficacé dans les efforts organisationnels.

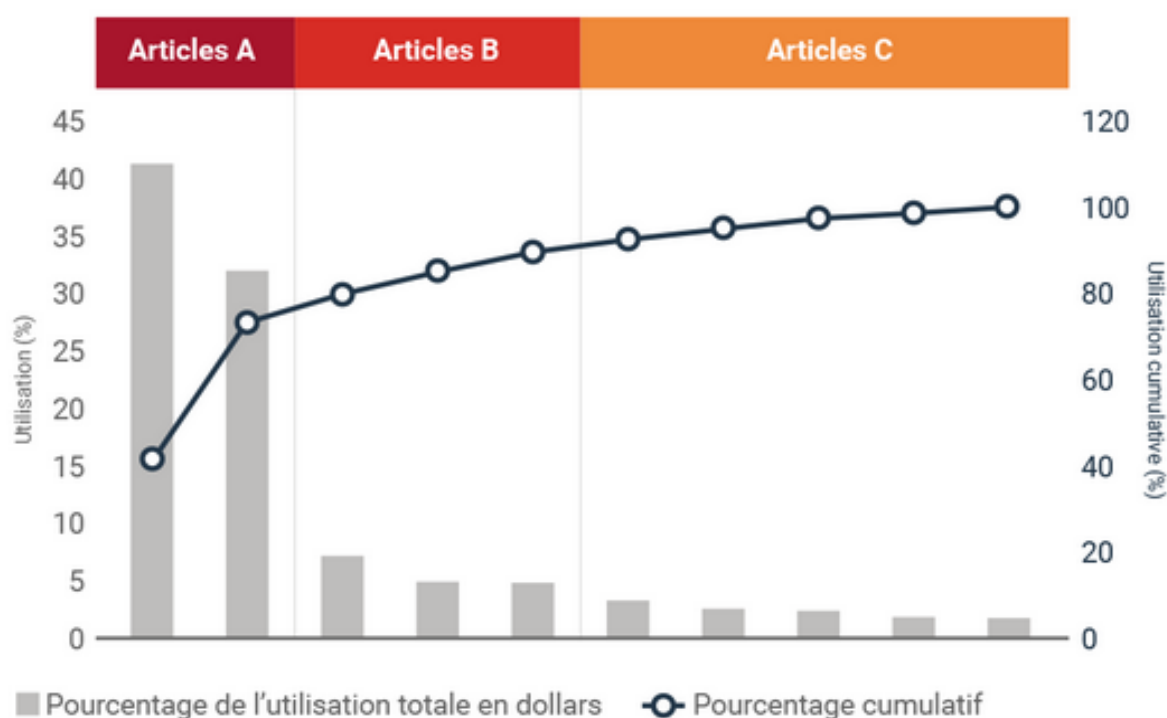


Figure V. 1 Exemple de diagramme de Pareto

V.2.1. Le principe de Pareto

Le principe de Pareto, également connu sous le nom de règle des 80/20, postule qu'environ 80 % des effets proviennent de 20 % des causes. Ce concept constitue une observation générale concernant la corrélation disproportionnée entre les causes et les effets observés dans divers domaines.

Au cours des années 1900, Vilfredo Pareto, un économiste italien, a mené de nombreuses études qui ont révélé que 20 % de la population de son pays possédait 80 % de la richesse totale. Dans les années 1940, Joseph Juran, ingénieur, a introduit la loi 80/20, qui a facilité la distinction entre les « quelques éléments essentiels » (les 20 % ayant un impact significatif) et les « nombreux insignifiants » (les 80 % restants). Cette distribution semble se produire naturellement.

En effet, lorsqu'il est projeté, ce principe est vrai dans de nombreux domaines. Une minorité de causes est responsable de la majorité des résultats ou des impacts. Par exemple, 20 % des bogues logiciels sont à l'origine de 80 % des pannes et 20 % des articles en stock représentent 80 % des coûts de stockage. Avez-vous analysé la structure de vos ventes ? En règle générale, 20 % des clients génèrent 80 % des revenus. D'où le nom alternatif : la loi 20/80 (ou 80/20).

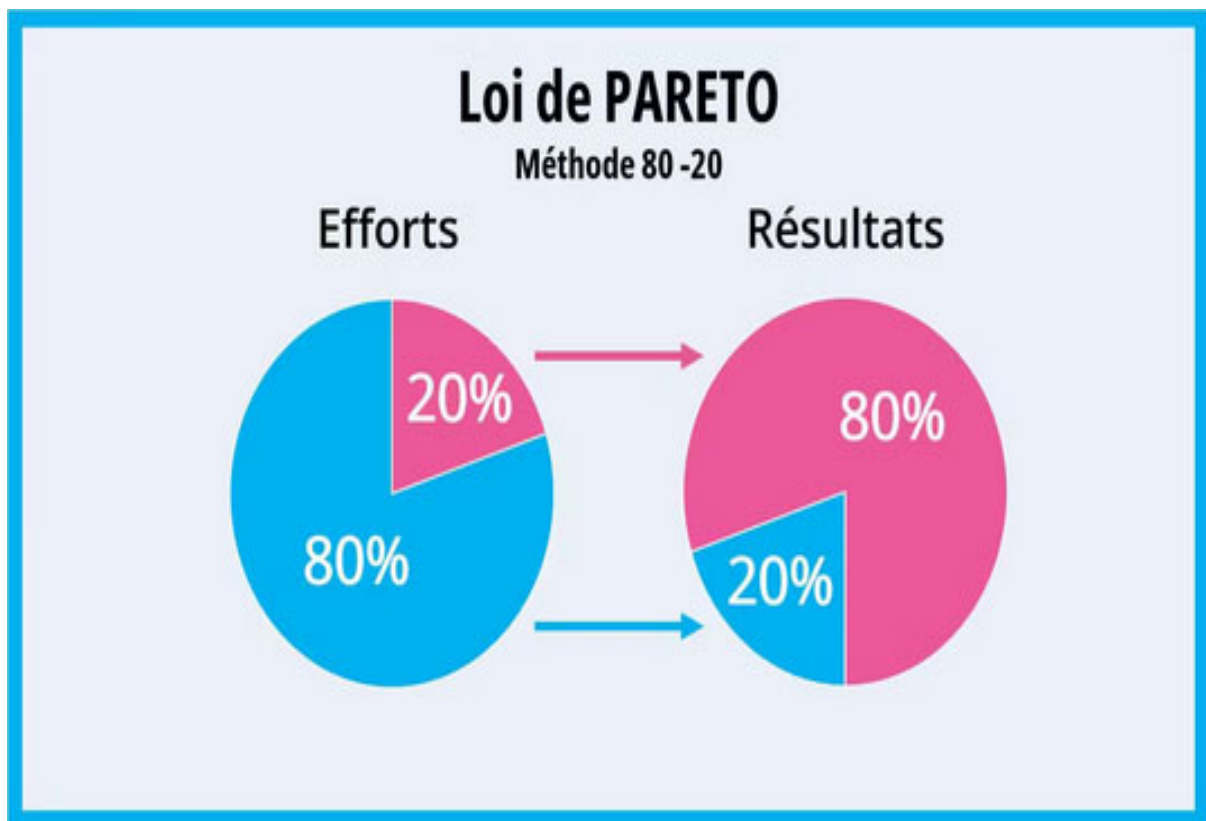


Figure V. 2 Loi de Pareto (Méthode 80-20)

Il convient de noter qu'il existe une variante connue sous le nom de méthode ABC, qui classe les données observées en trois classes : A (généralement de 20 % à 80 %), et les données restantes sont réparties entre les classes B et C. Cette classification est couramment

utilisée dans la gestion des stocks. La distribution 80/20 reste largement théorique, bien qu'elle soit souvent observée dans la pratique. Il constitue néanmoins un point de référence précieux pour l'étude d'un sujet et des processus de décision.

Pour mieux comprendre cette loi on peut se référer à l'exemple suivant: si un constructeur automobile de renom produit au total quatre modèles de voitures distincts. Parmi ces quatre modèles, celui qui se distingue comme étant l'option la plus économique parvient remarquablement à remporter un immense succès, dans la mesure où les ventes générées par ce modèle représentent à elles seules 80 % du chiffre d'affaires total réalisé par l'entreprise. Après une analyse méticuleuse des données disponibles, on constate qu'il devient impératif pour le fabricant d'allouer une part significative de ses ressources et de ses efforts au modèle susmentionné, car il apparaît comme la principale source de revenus de l'entreprise. Pour mener bien notre travail nous essayons de projeter les principes de cette loi de Pareto sur les projets de réhabilitation.

V.3. Présentation de cas d'étude:

Skikda, située au nord-est de l'Algérie, est réputée comme l'une des plus anciennes villes côtières du pays. Bien qu'elle possède de précieux actifs immobiliers, elle a malheureusement été complètement négligée. Le centre-ville de Skikda témoigne de son riche patrimoine matériel, couvrant diverses périodes historiques telles que l'Antiquité, la période romaine, la période vandale, la période arabo-musulmane, la période coloniale, la période coloniale et l'indépendance. Cependant, l'état actuel du centre-ville de Skikda, tout comme les vieux quartiers de style colonial en Algérie, connaît une sur densification et une marginalisation. Ce patrimoine architectural, qui englobe une partie importante de l'environnement bâti, a le potentiel de servir de force stabilisatrice pour prévenir les ruptures et la détérioration historiques. Malheureusement, il reste désorganisé et endommagé. Il devient donc impératif de reconnaître la nécessité d'une mise à niveau afin de préserver cet héritage et de créer un environnement vivable qui favorise le bien-être des habitants de la ville.

Pour remédier à ce problème, un projet de réhabilitation a été lancé. Cependant, d'un point de vue technique, un défi majeur se pose : « pour réussir un projet de réhabilitation, il est essentiel de s'assurer à la fois d'une expertise précise et d'un suivi assidu de l'avancement du projet », affirme le directeur du Collège national des experts en architecture (CNEA). Il

souligne en outre que « s'appuyer uniquement sur des politiques fondées sur les chiffres ne donnera aucun résultat fructueux ».

Il devient donc essentiel de consacrer une partie de la recherche à l'analyse d'un projet situé dans un cadre socio-urbain spécifique. L'objectif principal est d'éliminer toute ambiguïté et de clarifier le cadre typologique de ses constructions, afin de fournir à terme des réponses complètes aux nombreuses questions qui entourent notre problème.

V.3.1. Présentation de la ville de Skikda

V.3.1.1. Situation et limites de la ville

Blottie entre la mer Méditerranée et les wilayas d'Annaba, Constantine, Jijel et Guelma et s'étalant sur presque 13 Km de côtes, où se succèdent des plages les unes plus féeriques que les autres, la wilaya de Skikda est située à l'Est du littoral Algérien sur une

superficie de 4 137,68 Km². Elle est issue du découpage administratif de 1974 abritant sous sa coupe 13 daïras et 38 communes.

Point de chute des flux commerciaux provenant des villes limitrophes, plaque tournante commerciale entre les quatre points cardinaux, centre de jonction entre l'intérieur de la région et la mer, Skikda l'Est, et ce, à travers les différentes périodes d'occupation qui s'y sont succédées grâce à son port (confondu à juste titre avec celui de Stora) qui recèle une particularité, celle de se trouver au centre du Sinus Numidicus des Romains ou golfe de Numidie, l'un des golfes les plus importants de l'Afrique du Nord, entre le cap Bougarouni, à l'Ouest, et le cap de Fer à l'Est.

La vieille ville (romaine et coloniale) a pris naissance sur le site de la vallée du Zeramna enserrée entre les collines de Bouyala-Sebâe Biar à l'Ouest et celles de Skikda-les Mouaddels (appelée communément Bouabbaz) à l'Est :

L'Est du pays, se scinde en deux chaînes montagneuses, parallèlement à la côte méditerranéenne.

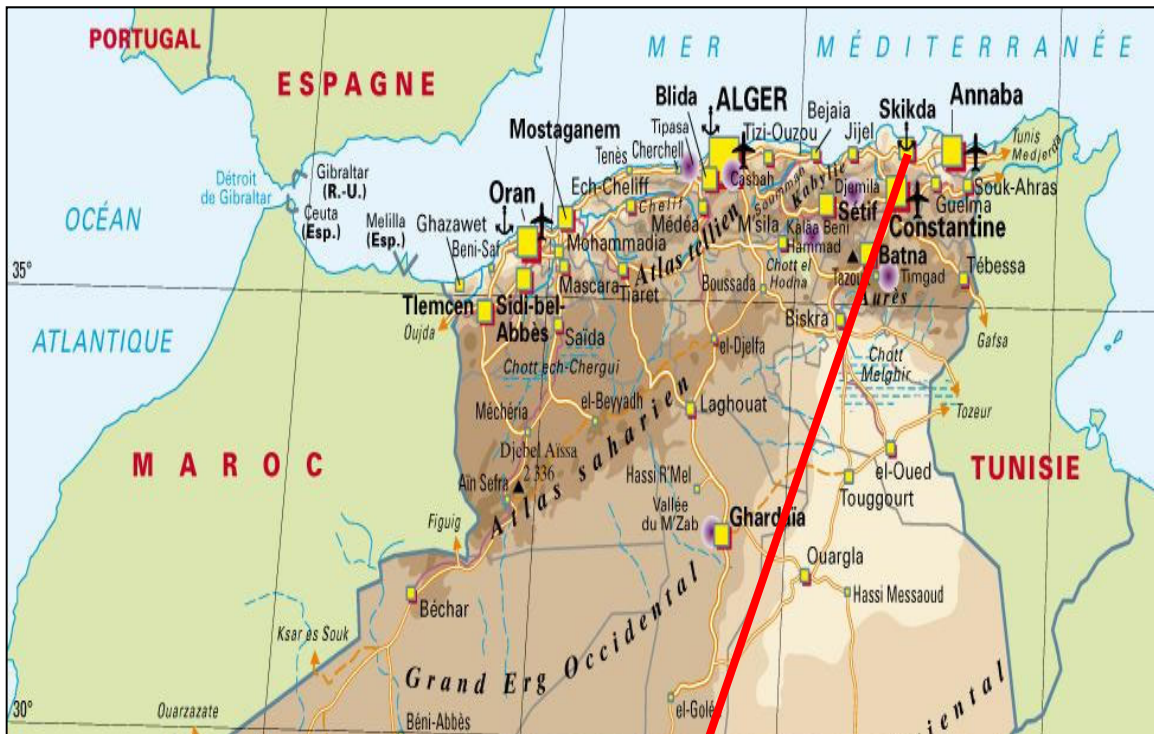


Figure V. 3 Situation de la Wilaya de Skikda par rapport aux villes.

V.3.1.2. Climatologie:

Du point de vue climatique, la région de Skikda est dominée par un climat du type méditerranéen caractérisé par un hiver doux et pluvieux et un été sec et chaud. Les précipitations moyennes annuelles enregistrées varient entre 800 et 1 200 mm de pluies, ce qui permet le développement d'une couverture végétale luxuriante et abondante se traduisant sur le terrain par la densité des forêts de chênes liège et la biodiversité importante qui caractérise les écosystèmes terrestres, marins et d'eau douce (rivières, lacs, ...). Cette abondance de pluie explique également le vaste réseau hydrographique constitué par les cours d'eau permanents et alimente les réserves en eau souterraine sous forme de nappes phréatiques.

V.3.1.3. Température:

La Wilaya de Skikda est sous l'influence du climat marin. Les températures sont douces en hiver et chaudes en été (Skikda) ; cela est valable pour le littoral où les amplitudes thermiques sont faibles. Moins douces en hiver et plus chaudes en été (Azzaba) à l'intérieur de la wilaya, par contre elles sont fraîches au niveau des montagnes.

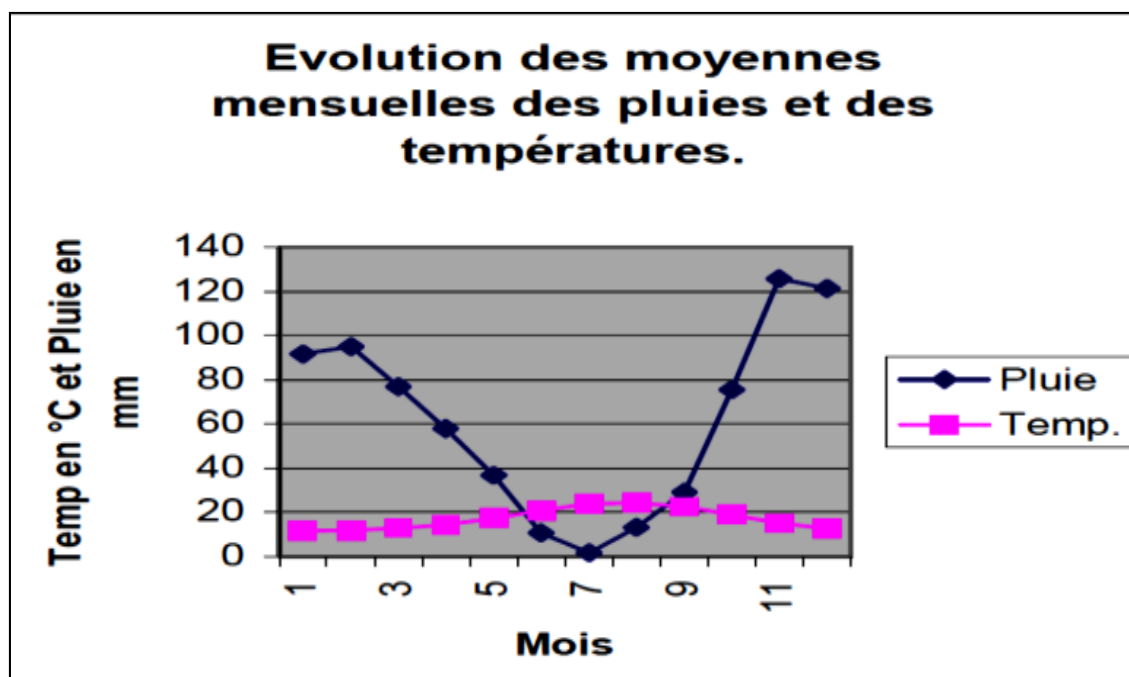


Figure V. 4 Graphe d'évolution des moyennes mensuelles des pluies et des températures

V.3.1.4. Vent :

Les vents dominants sont d'Ouest en Est, chargés d'humidité au Sud-Ouest. Au niveau des piémonts, on note la présence d'un vent chaud et sec : le Sirocco.

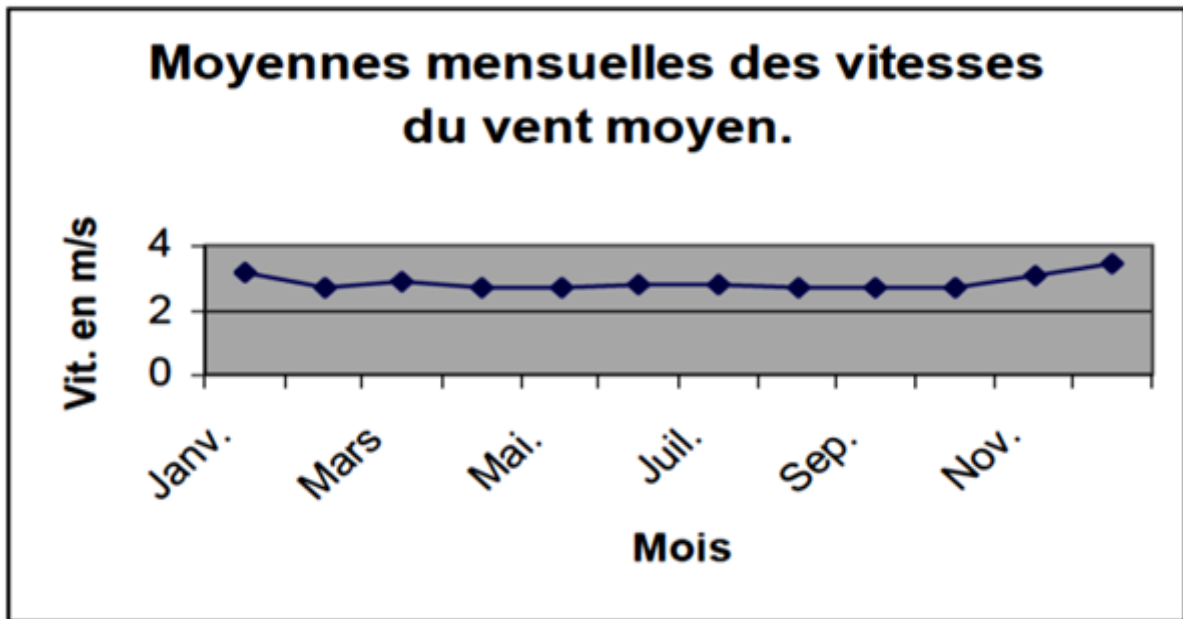


Figure V. 5 Graphe des Moyennes mensuelles des vitesses du vent moyen.

V.4. Localisation du cas d'étude

L'étude de cas actuelle est un projet de réhabilitation d'une ancienne rue située dans le centre ville de Skikda,. La rue est construite sur les vestiges des ruines qui remontent à l'époque romaine, vu que le ravin qui traversait la ville a été comblé et est devenu par la suite la rue nationale qui s'appelle actuellement la rue de Didouche Mourad. De plus, cette rue traverse la ville du Sud jusqu'au port au Nord, devenant ainsi la voie principale et historique de la ville, les autres rues étant conçues de manière parallèle et perpendiculaire à celle-ci. De part et d'autre de la rue, 24 îlots sont soutenus par de grands piliers avec des arcades et des magasins au rez-de-chaussée, soit 127 bâtiments. Leurs étages supérieurs sont destinés à l'habitation et parfois à l'administration. Cependant, nous nous intéressons ici principalement à leur état de dégradation ; alors que la question posée est celle de la réhabilitation de ces constructions. Les autorités locales ont pris des mesures il y a quelques années, et ont décidé de revaloriser ces bâtiments des constructions du tissu urbain ancien de la ville, en commençant par la rue Didouche Mourad (Figure 5), en tant que rue principale, et en généralisant ensuite ce processus pour les autres constructions. Par la suite, notre étude se concentre sur le processus de réhabilitation dans la phase de projet et peut atteindre la phase

d'entretien, pour un seul bâtiment qui est situé dans le quartier n° 49 (figure 6), îlot 14, construction n° 01, et qui a fait l'objet d'une réhabilitation.



**Figure V. 6 Plan d'intervention pour la réhabilitation des constructions sur l'axe
Didouche Mourad**



Figure V. 7 Localisation du projet d'étude de cas

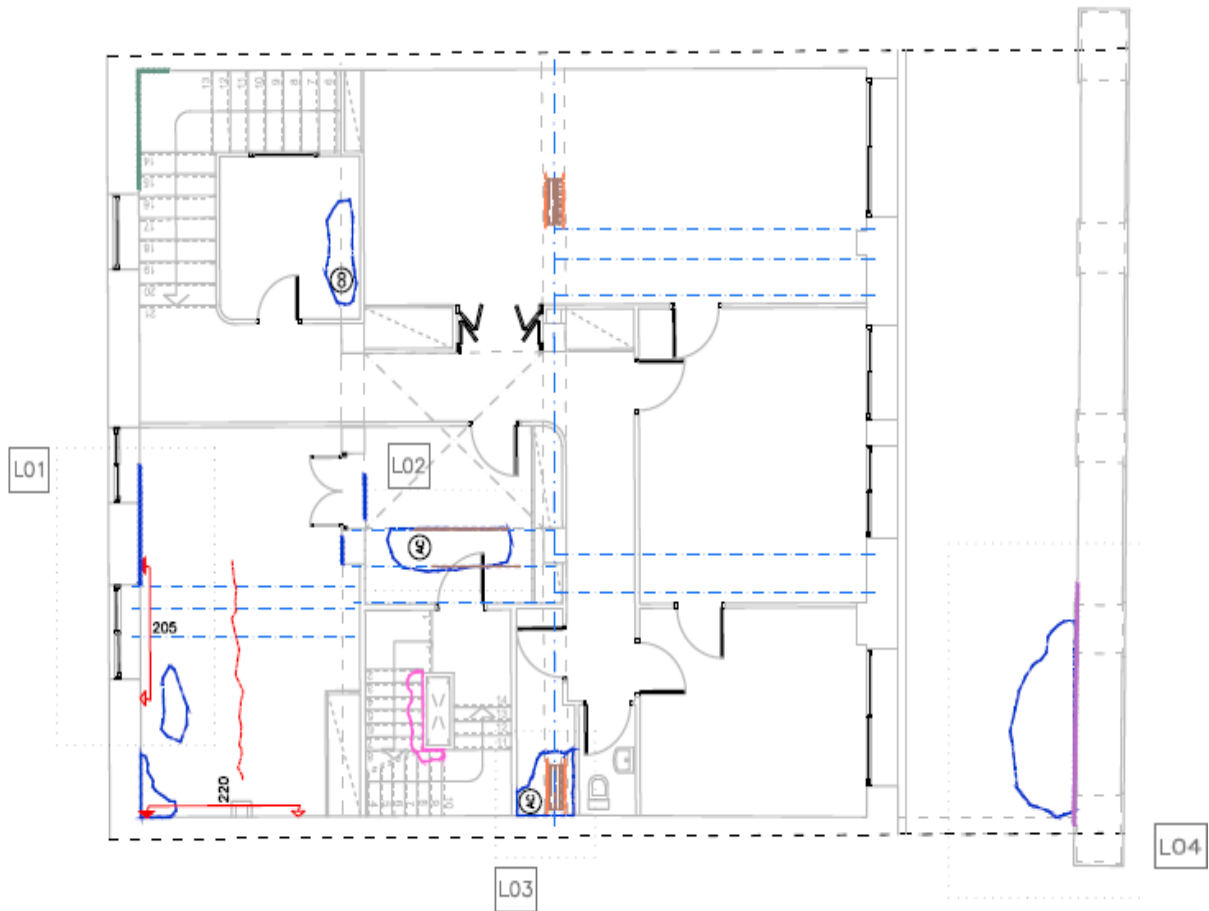
V.5. Diagnostic et étude de réhabilitation

Le travail consiste à réaliser une étude exhaustive des bâtiments à réhabiliter en dessinant les plans de toutes et chacune des unités d'habitation qui les composent pour commencer à rédiger un projet exécutif qui permette d'attaquer et de réparer les pathologies distinctes détectées. Dans une étude de ces caractéristiques, il est difficile de définir avec la plus grande précision possible la limite d'intervention. Il ne serait pas estimable et cohérent d'entreprendre une réforme dans une profondeur de tout le parc urbain par le manque de ressources et de budget, ainsi que par un manque d'efficacité. De ressources et de budget, de même qu'une simple retouche des bâtiments ne serait pas non plus éligible en oubliant d'entreprendre et de réparer plusieurs des pathologies graves détectées, la figure.7 montre quelques pathologies échantillonnées.

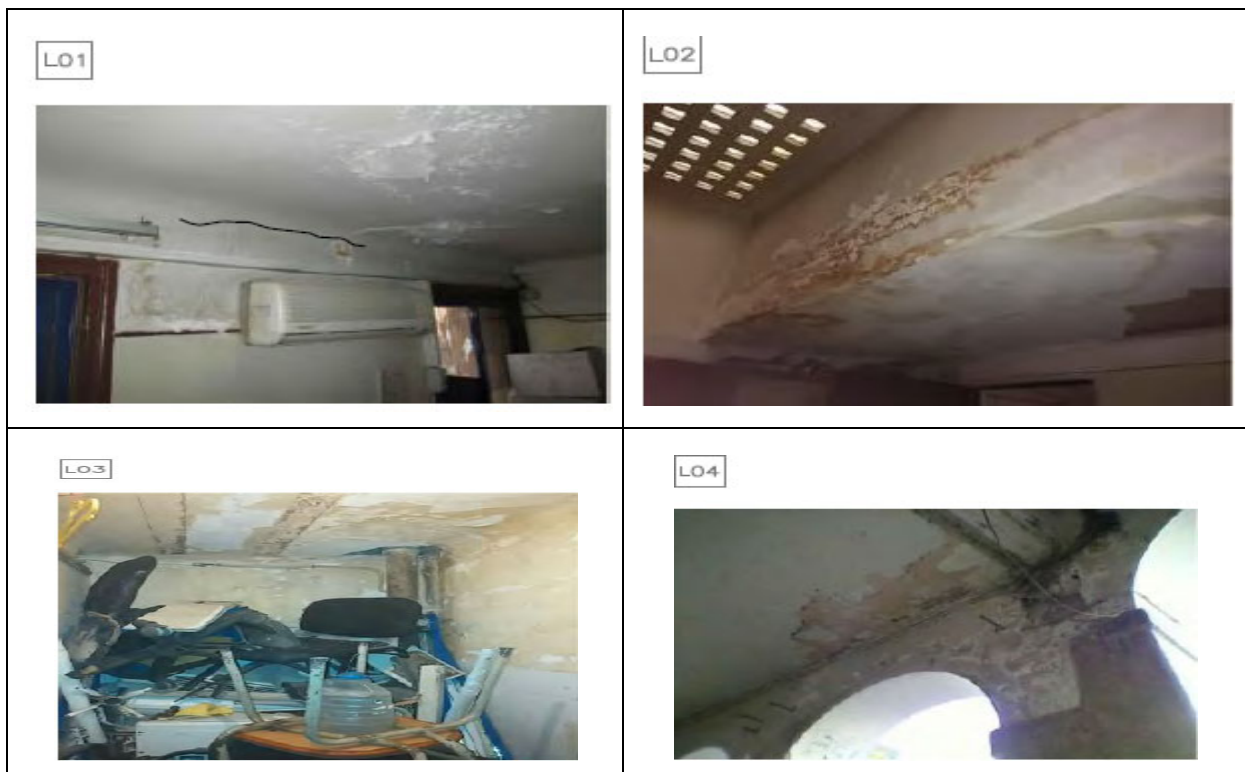
V.6. Emplacement et localisation

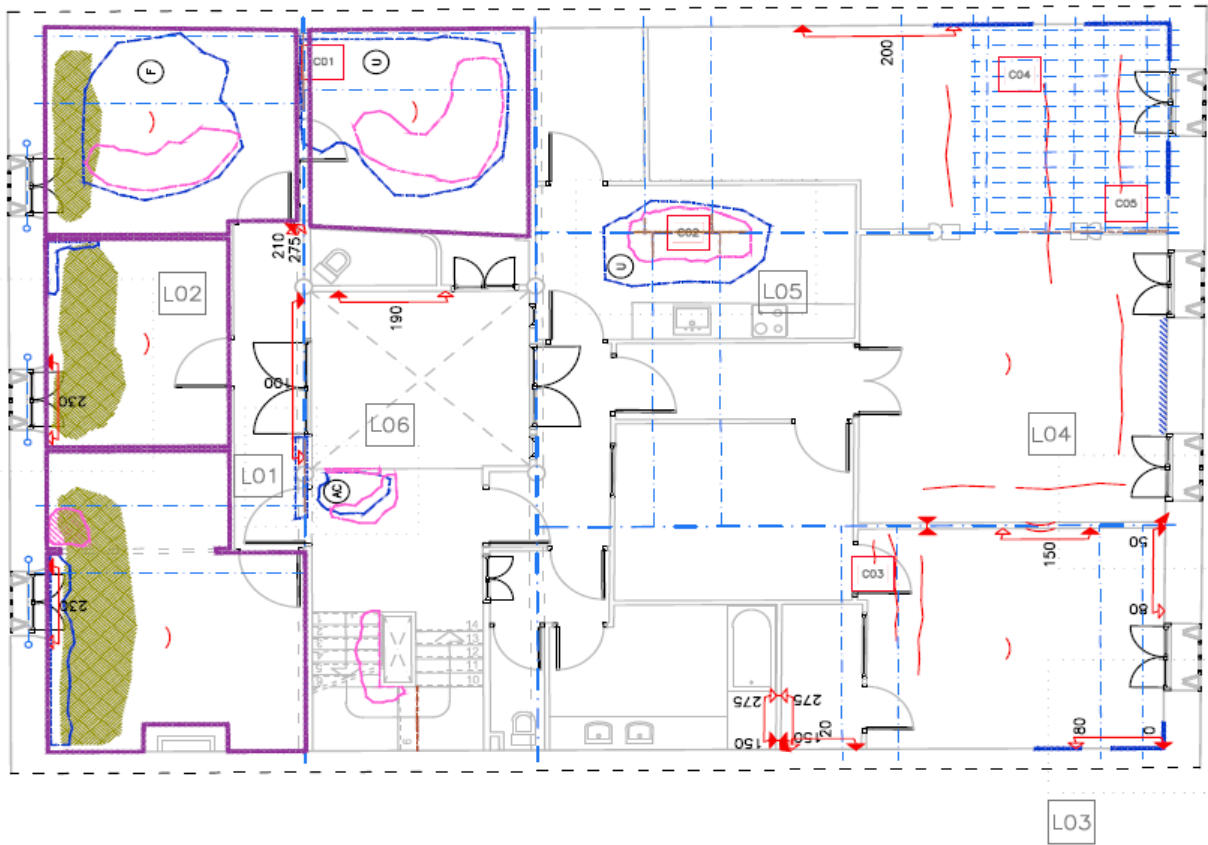


Figure V. 8 Localisation et Emplacement du Bt 14-2

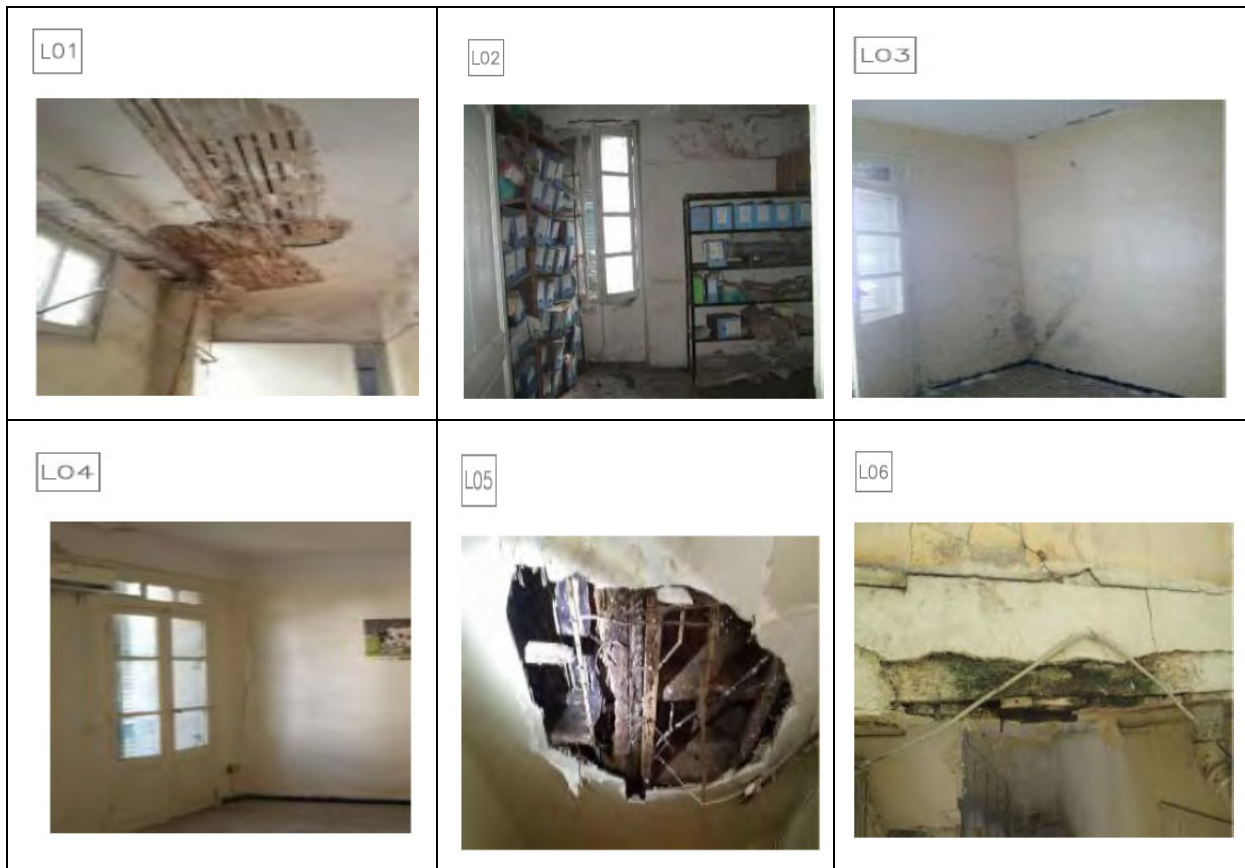


Levé des pathologies au niveau du 1er étage

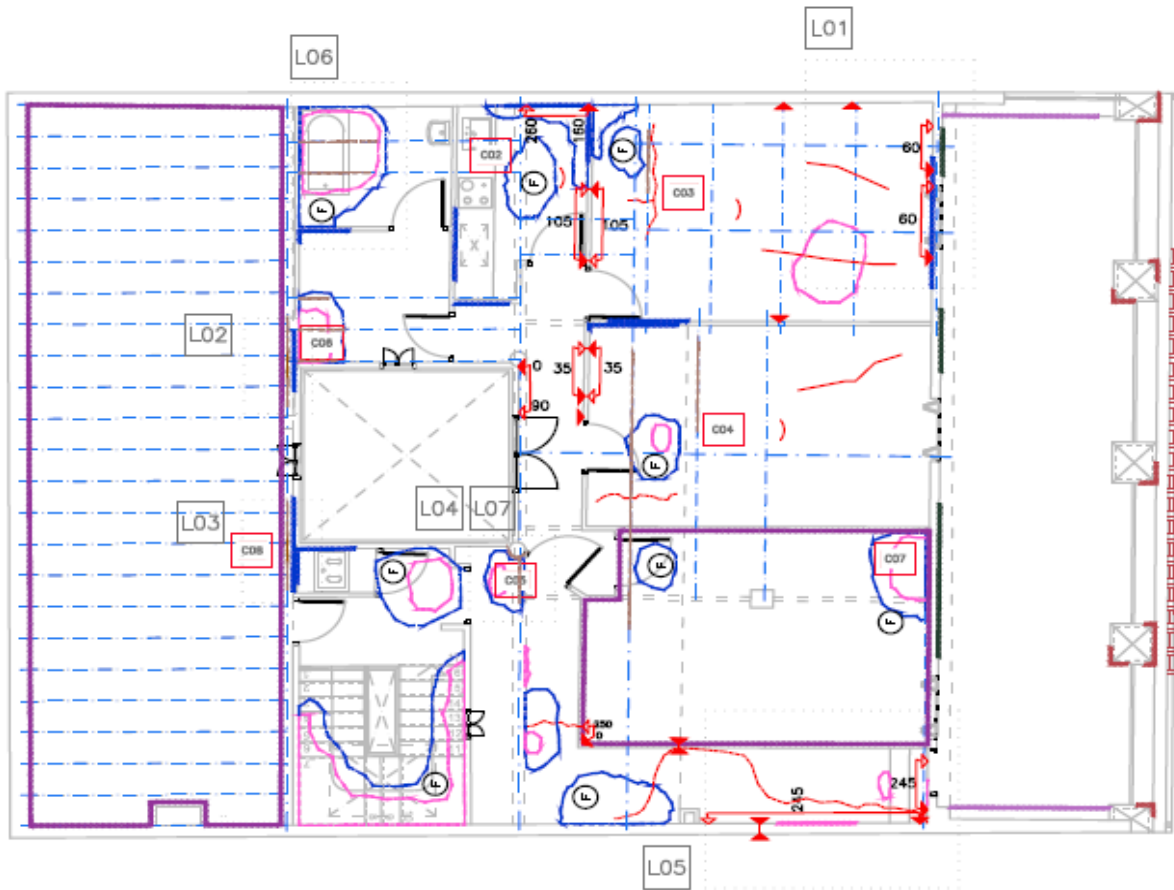




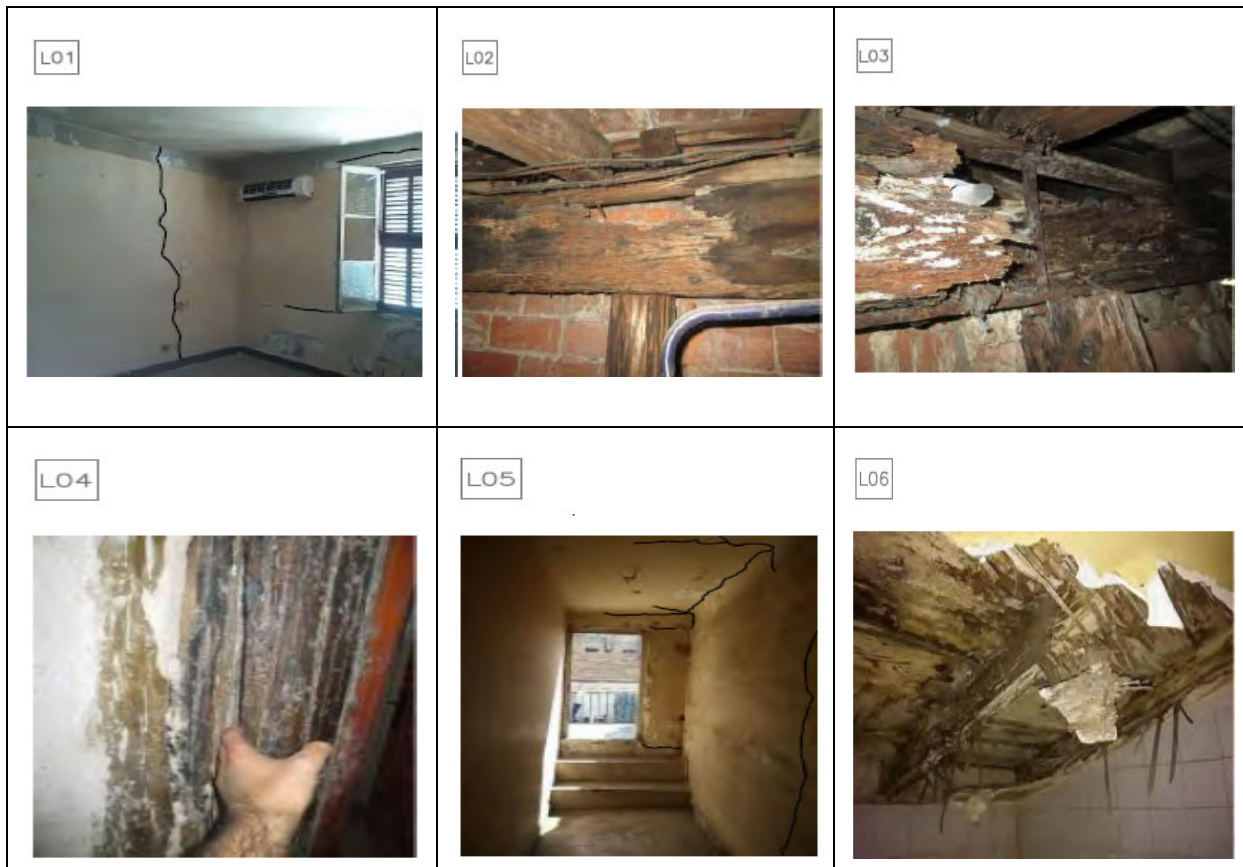
Levé des pathologies au niveau du 2ème étage



Chapitre V. Développement et Analyse



Levé des pathologies au niveau du 3ème étage





Levé des pathologie au niveau du façade Principale



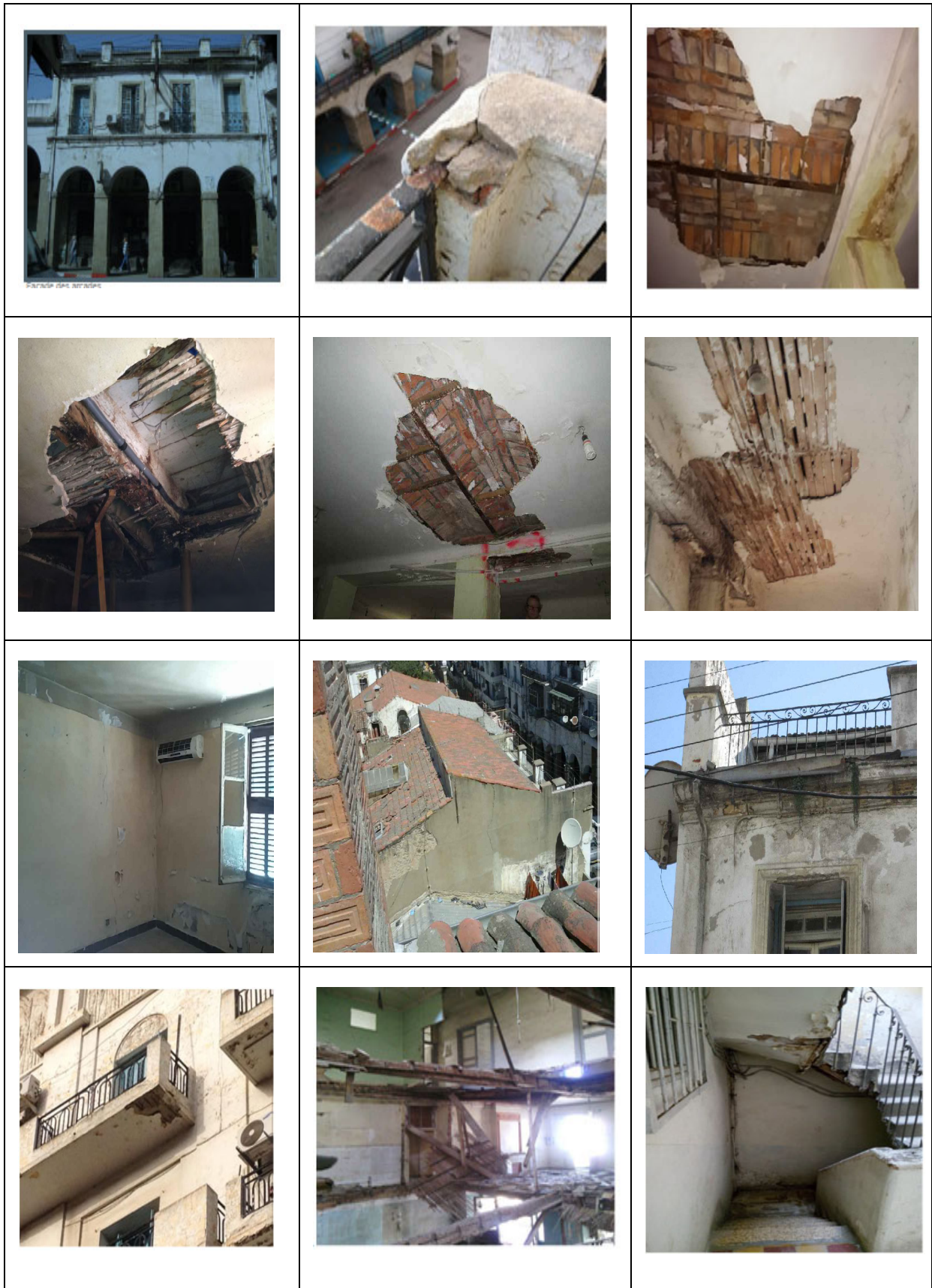


Figure V. 9 Diagnostic et levé d'état de dégradation et des pathologies existantes.

V.7. Données numériques du cas d'étude

Tableau V. 1 Codes des articles du bâtiment B1

T	N°	Désignation des travaux	Code article
B1	1	Préparation de chantiers et interruption, revision et modification de rédeau	1.1.02.A
B1	2	Démolition plancher en bois	1.2.01
B1	3	Démolition de faux plafond en roseaux	1.2.12
B1	4	Démolition d'élément illicite/non conforme lourd	1.3.01.A
B1	5	Profil normalisé d'acier structurel S275J UPN 180	2.1.08
B1	6	Ancrage avec connecteur expansion 12 mm	2.1.52
B1	7	Profil normalisé d'acier structurel S275J IPE 450	2.1.83
B1	8	Plancher plaque pliée type Eurobase 106' et Béton	2.4.31
B1	9	Toiture inclinée Tuile plate ou canal	3.1.05
B1	10	Etanchéité et revêtement de terrasse accécible	3.1.07

Tableau V. 2 Codes des articles du bâtiment B2

BT	N°	Désignation des travaux	Code article
B2	1	Préparation de chantiers et interruption, revision et modification de rédeau	1.1.02.A
B2	2	Démolition plancher en bois	1.2.01
B2	3	Démolition de faux plafond en roseaux	1.2.12
B2	4	UPN 160 Pour Palier	2.1.22
B2	5	Profil normalisé d'acier structurel S275J IPE 450	2.1.88
B2	6	Inscticide et fongicide pour bois	2.2.19
B2	7	Poutrelle bois laminée 200 x 250 mm	2.2.34
B2	8	Poutrelle bois laminée 75 x 250 mm	2.2.35
B2	9	Plancher plaque pliée type Eurobase 106' et Béton	2.4.31
B2	10	Toiture inclinée Tuile plate ou canal	3.1.05
B2	11	Finition Rencontre Toiture -Façade	3.4.R1
B2	12	Finition Rencontre Toiture -Façade Avec Corniche	3.4.R2
B2	13	Finition Rencontre Toiture -Mur Mitoyen	3.4.R3

Tableau V. 3 Codes des articles du bâtiment B3

BT	N°	Désignation des travaux	Code article
B3	7	Ancrage avec connecteur expansion 12 mm	2.1.52
B3	8	Mur Porteur Brique	2.3.31
B3	9	Plancher plaque pliée type Eurobase 106' et Béton	2.4.31
B3	10	Béton pour Plancher Unidirectionel	2.4.32
B3	11	Etanchéité et revêtement de terrasse accessible	3.1.07
B3	12	Enduit à la chaux	3.2.01
B3	13	Remplacement de volet et presienne en Bois	3.3.02.A
B3	14	Remplacement de Fenêtre ou porte vitrée	3.3.02.B
B3	15	Remplacement de porte en Bois	3.3.02.C
B3	16	Couronnement avec pièce céramique	3.4.R4
B3	17	Peinture étanche et finition Pation	4.1.01
B3	18	Crépissage avec mortier Ciment	4.1.02.A
B3	19	Faux pladond en platre	4.2.04.A
B3	20	Faux pladond en platre + isolant thermique	4.2.04.B
B3	21	Cable de 4 x 50 mm ²	5.3.04.A
B3	22	Cable de 5x 16 mm ²	5.3.04.D
B3	23	Cable conducteur de Cuivre 450/750 v	5.3.04.E
B3	24	Cable conducteur de Cuivre nu	5.3.05
B3	25	Tube Flexible endulé en plastique Sans Halogène de 40 mm	5.3.08.A
B3	26	Substitution installation tube de reprise	5.6.01

Tableau V. 4 Codes des articles du bâtiment B4

BT	N°	Désignation des travaux	Code article
B4	1	Préparation de chantiers et interruption, revision et modification de rédeau	1.1.02.A
B4	2	Travaux d'excavation	1.1.06
B4	3	Démolition plancher métallique	1.2.02.B
B4	4	Etayage de plancher h>3m	2.0.06
B4	5	Remplissage mortier renforcement structurel	2.0.10
B4	6	Profil normalisé d'acier structurel S275J UPN 180	2.1.08
B4	7	Profil normalisé d'acier structurel S275J IPE 270	2.1.51
B4	8	Profil normalisé d'acier structurel S275J HEB 140	2.1.54
B4	9	Ferme type e	2.1.58
B4	10	Profil normalisé d'acier structurel S275J IPE 140	2.1.59

Tableau V. 5 Codes des articles du bâtiment B4 (suite)

BT	N°	Désignation des travaux	Code article
B4	11	Béton détail DA-15 Ancrage avec connecteur expansion 12 mm	2.1.67
B4	12	Profil normalisé d'acier structurel S275J UPN 240	2.1.82
B4	13	Inscticide et fongicide pour bois	2.2.19
B4	14	Mur porteur en brique 14 cm	2.3.31
B4	15	Plancher plaque pliée type Eurobase 106' et béton	2.4.31
B4	16	Béton armé por radier e= 15 cm	2.4.36
B4	17	Toiture inclinée Tuile plate ou canal	3.1.05
B4	18	Enduit à la chaux	3.2.01
B4	19	Peinture de CREPI	3.2.08
B4	20	Remplacement de volet et presienne en Bois	3.3.02.A
B4	21	Remplacement de Fenêtre ou porte vitrée	3.3.02.B
B4	22	Remplacement de porte en Bois	3.3.02.C
B4	23	Peinture étanche et finition Pation	4.1.01
B4	24	Crépissage avec mortier Ciment	4.1.02.A
B4	25	Porte et fenêtre au logement	4.1.06
B4	26	Etanchéité et finition salle de bains	4.2.01
B4	27	Faux plafond en plâtre	4.2.04.A
B4	28	Faux plafond en plâtre + isolant thermique	4.2.04.B
B4	29	Retouche d'enduit de platre parement vertical	4.2.06.A
B4	30	Pation interieur	4.2.07
B4	31	Cable de 3 x 16 mm ²	5.3.04.B
B4	32	Cable conducteur de Cuivre nu	5.3.05

Tableau V. 6 Coût moyen par Bâtiment

	Coût en HT	Nombre d'articles	Moyenne
Bâtiment n°01	14 058 032,960	49	286 898,632
Bâtiment n°02	12 262 602,100	40	306 565,053
Bâtiment n°03	39 208 112,600	107	366 430,959

Chapitre V. Développement et Analyse

Bâtiment n°04	71 101 854,450	142	500 717,285
----------------------	----------------	------------	-------------

Tableau V. 7 Répartition des fréquences par bâtiment

Batis n°	code	unité	Quantité	PU	Montant en HT	Devis Batis 1	Devis Batis 2	Devis Batis 3	Devis Batis 4	
B1	1	1.1.02.A	u	1,000	1400000,00	1400000,00	X	X	X	X
B1	2	1.2.01	m ²	195,447	2800,00	547251,60	X	X		
B4	3	1.2.02.B	m ²	702,000	2500,00	1755000,00			X	X
B3	2	1.1.06	u	1,000	1400000,00	1400000,00			X	X
B1	3	1.2.12	m ²	667,860	800,00	534288,00	X	X	X	
B1	4	1.3.01.A	m3	447,570	8000,00	3580560,00	X		X	
B4	4	2.0.06	m ²	541,000	1000,00	541000,00				X
B4	5	2.0.10	dm3	1 879,200	850,00	1597320,00				X
B1	5	2.1.08	kg	4 621,760	150,00	693264,00	X		X	X
B2	4	2.1.22	kg	2 073,264	150,00	310989,60		X		
B4	7	2.1.51	kg	3 176,800	180,00	571824,00				X
B1	6	2.1.52	u	386,000	1000,00	386000,00	X		X	
B4	8	2.1.54	kg	6 378,736	180,00	1148172,48				X
B4	9	2.1.58	u	3,000	180000,00	540000,00				X
B4	10	2.1.59	kg	6 427,425	150,00	964113,75				X
B4	11	2.1.67	u	893,000	2700,00	2411100,00				X
B4	12	2.1.82	kg	038,200	150,00	2105730,00				X
B1	7	2.1.83	kg	1 218,320	350,00	426412,00	X			
B2	5	2.1.88	kg	2 587,200	150,00	388080,00		X		
B2	6	2.2.19	ml	248,850	1800,00	447930,00		X		X
B2	7	2.2.34	ml	21,060	20000,00	421200,00		X		
B2	8	2.2.35	ml	53,760	20000,00	1075200,00		X		
B4	14	2.3.31	m3	57,927	55000,00	3185985,00			X	X
B1	8	2.4.31	m ²	80,560	12000,00	966720,00	X		X	
B3	10	2.4.32	m3	94,354	58000,00	5472532,00			X	

B4	16	2.4.36	m ²	132,000	8500,00	1122000,00				X
----	----	--------	----------------	---------	---------	------------	--	--	--	---

Tableau V. 8 Répartition des fréquences par bâtiment (suite)

code	unité	Quantité	PU	Montant en HT	Fréquence			
					Devis Batis 1	Devis Batis 2	Devis Batis 3	Devis Batis 4
3.1.05	m ²	191,897	8850,00	1698288,45	X	X		X
3.1.07	m ²	81,150	9500,00	770925,00	X		X	
3.2.01	m ²	355,210	3800,00	1349798,00			X	X
3.2.08	m ²	744,100	2500,00	1860250,00				X
3.3.02.A	u	14,000	60000,00	840000,00			X	X
3.3.02.B	u	12,000	50000,00	600000,00			X	X
3.3.02.C	u	3,000	200000,00	600000,00			X	X
3.4.R1	ml	58,400	6000,00	350400,00		X		
3.4.R2	ml	58,400	6000,00	350400,00		X		
3.4.R3	ml	49,160	6500,00	319540,00		X		
3.4.R4	ml	50,610	8000,00	404880,00			X	
4.1.01	m ²	147,140	11000,00	1618540,00			X	X
4.1.02.A	m ²	316,958	2000,00	633916,00			X	X
4.1.06	u	15,000	80000,00	1200000,00				X
4.2.01	m ²	606,100	3500,00	2121350,00				X
4.2.04.A	m ²	371,060	3800,00	1410028,00			X	X
4.2.04.B	m ²	329,580	4000,00	1318320,00			X	X
4.2.06.A	m ²	1 494,500	400,00	597800,00				X
4.2.07	m ²	739,650	2000,00	1479300,00				X
5.3.04.A	ml	200,000	6500,00	1300000,00			X	
5.3.04.B	ml	220,000	2500,00	550000,00				X
5.3.04.D	ml	200,000	7000,00	1400000,00			X	
5.3.04.E	ml	200,000	4000,00	800000,00			X	

Chapitre V. Développement et Analyse

5.3.05	ml	200,000	2800,00	560000,00			X	X
5.3.08.A	ml	200,000	2500,00	500000,00			X	
5.6.01	ml	84,000	8000,00	672000,00			X	

Tableau V. 9 Les fréquences du coût significatif par lot de travail

Cswp N°	Coût significatif par lot de travail(CSWP)	Unit	Quantitis							Prix U REFERE	total						
			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
1	Preparation of construction sites	u	1	1		1	1	1	1	984 062	984 062	562 156	0	984 062	984 062	984 062	2 984 062
2	Wooden floor demolishing	M2	129	249		326	400	390		2 800	361 760	697 200	0	911 400	1 120 000	1 092 000	0
3	Demolition of false ceiling in reeds	M2	668	350			580	732	480	800	534 724	280 000	0	0	464 000	585 600	384 000
4	Standardized structural steel profile S275JUPN 180	kg	4 622			16 540	18 500		20 505	150	693 261	0	0	2 481 000	2 775 000	0	3 075 700
5	UPN 160 For Bearing	kg		240			356	2 050		150	0	36 000	0	0	53 416	307 500	0
6	Anchor with 12 mm expansion connector	u	386		331		423	611	431	1 000	386 000	0	330 500	0	423 000	611 000	431 000
7	Plastering with cement mortar	ml		300		2 000		302	412	2 000	0	600 000	0	4 000 000	0	604 000	824 000
8	Brick load-bearing wall 14 cm	M3		24	45	66		60	35	55 000	0	1 320 000	2 466 750	3 630 000	0	3 300 000	1 925 000
9	Reinforced concrete for raft of = 15 cm	M3	248		488		350		375	8 500	2 108 000	0	4 148 000	0	2 975 000	0	3 187 500
10	Concrete for Unidirectional Flooring	M3			95			171	160	58 000	0	0	5 481 000	0	0	9 913 940	9 280 000
11	Sloped roof Flat roof tile or channel	ml	192	231		488	697	780		8 850	1 698 288	2 043 323	0	4 314 375	6 168 450	6 903 000	0
12	Laminated timber beam 200 x 250 mm	ml	21		62		625		580	20 000	421 200	0	1 240 000	0	12 490 000	0	11 600 000
13	Waterproof paint and Paton finish	ml	120		175	200	294	440		11 000	1 320 000	0	1 925 000	2 200 000	3 234 000	4 840 000	0
14	Lime plaster	ml		200	565	748		980	1 045	3 800	0	760 000	2 145 100	2 842 400	0	3 724 000	3 971 000
15	Door and window to housing	u		30	45			133	181	80 000	0	2 400 000	0	3 600 000	0	10 640 000	14 480 000
16	Sealing and bathroom finishing	ml	400	362		606	870		890	3 500	1 400 000	1 267 000	0	2 121 350	3 044 650	0	3 115 000
17	Retouching of plaster vertical siding	ml			1 257	1 866		2 016		400	0	0	502 766	746 322	0	806 301	0
18	Plasterboard false plasterboard + thermal insulation	ml	165		425	534		644		4 000	660 000	0	1 700 900	2 136 000	0	2 576 000	0

Tableau V. 10 Valeurs des devis et taux à 7 % et 93 %. du P1 au P7

Cswp value en DA	10 567 295,58	9 965 679,68	19 940 016,53	29 966 909,33	33 731 578,30	46 887 403,10	55 257 262,00
Bill value en DA	14058032,96	12262602,15	24059989,72	39208112,65	42263000,35	59211112,37	71101854,45

Taux à 7%	984062,3072	858382,1505	1684199,28	2744567,886	2958410,025	4144777,866	4977129,812
Taux à 93%	13073970,65	11404220	22375790,44	36463544,76	39304590,33	55066334,5	66124724,64
Total/quant	14058032,96	12262602,15	24059989,72	39208112,65	42263000,35	59211112,37	71101854,45

V.8. La méthode utilisée

Dans cette étude, nous construisons deux modèles. Le premier modèle (Figure 8), pour la phase "projet", est un modèle de processus pour un projet de réhabilitation de bâtiments anciens dans la rue Didouche Mourad, mentionnée dans le paragraphe précédent, par une méthode classique. La seconde présente le modèle (Figure9) du même projet mais avec une autre méthode (méthode BIM), par une méthode classique. méthode (méthode BIM), en présentant et en décrivant de manière formelle les tâches individuelles et collectives ainsi que les relations entre les acteurs de ce " projet ". ainsi que les relations entre les acteurs dans cette phase "projet". De plus, pour réaliser cette action, nous avons utilisé un langage de spécification qui est largement utilisé dans le domaine de la construction pour sa simplicité et sa clarté. En outre, nous parlons ici, pour modéliser les processus, du Business Process Model and Notation (BPMN). Ce dernier (BPMN) fait référence à plusieurs symboles et icônes pour faciliter la construction du modèle de processus sous forme de graphes ou de cartes.

V.9. Le diagramme du Business Process Model and Notation (BPMN)

Le Business Process Model and Notation (BPMN) ou norme de modélisation des processus métier, est une méthode d'organigramme qui représente de A à Z les différentes étapes planifiées d'un processus métier. L'objectif de ce modèle est d'explorer des approches visant à améliorer l'efficacité, à prendre en compte de nouveaux facteurs ou à acquérir un avantage concurrentiel. La technique a fait l'objet d'une standardisation ces derniers temps et est actuellement fréquemment désignée par un titre légèrement distinct.

Au niveau mondial, l'utilisation de la notation BPMN s'avère avantageuse pour toutes les parties prenantes impliquées dans un processus métier, car elle facilite une compréhension plus complète grâce à une représentation visuellement accessible de ses différentes étapes. À un niveau plus complexe, il s'adresse aux personnes responsables de la mise en œuvre dudit processus métier en leur fournissant suffisamment de détails pour garantir sa bonne exécution. De plus, il fournit un langage unifié et universel qui peut être compris par tout le personnel impliqué, quelle que soit son expertise technique, y compris les analystes commerciaux, les participants aux processus, les gestionnaires, les développeurs techniques, ainsi que les

équipes externes et les consultants. Idéalement, il établit un lien entre l'objectif du processus et son application pratique en offrant une grande quantité de détails et de visibilité sur l'organisation séquentielle des activités commerciales.

Une représentation graphique peut souvent s'avérer nettement plus compréhensible qu'une représentation textuelle. Il simplifie le processus de communication et de collaboration, pour finalement aboutir à un flux de travail efficace et à la production de résultats de haute qualité. En outre, il contribue à une communication efficace, aboutissant finalement à la génération de documents XML (Extensible Markup Language) nécessaires à l'exécution de divers processus. Le langage d'exécution des processus métier pour les services Web, plus connu sous le nom de BPEL/BEPEL4WS, est un exemple de l'une des principales normes XML utilisées.

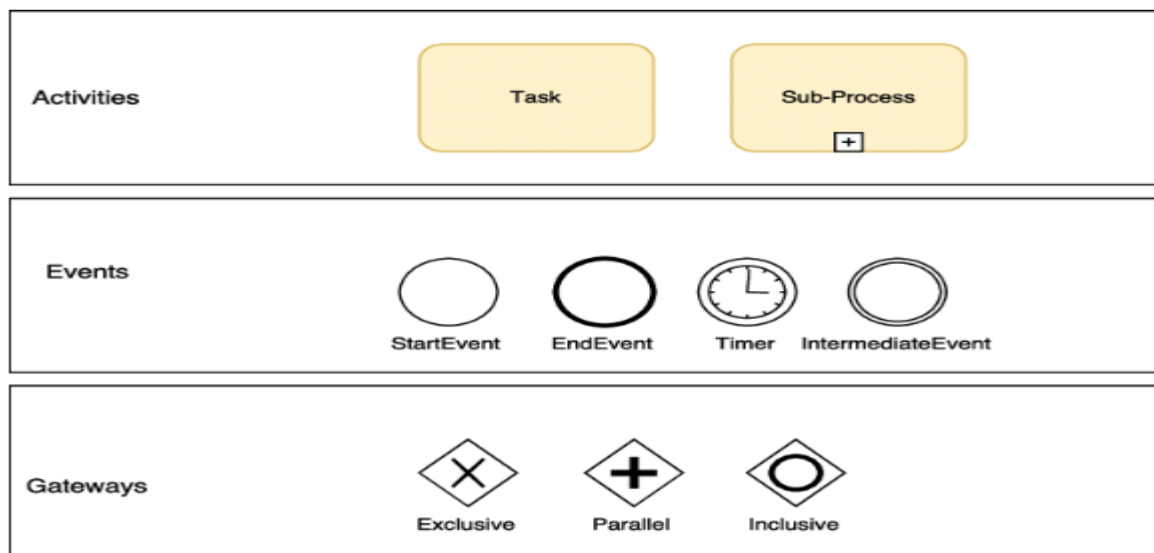


Figure V. 10 Éléments et symboles des BPMN

Le diagramme BPMN décrit ces quatre types d'éléments pour les diagrammes de processus commerciaux :

Objets de flux : événements, activités, passerelles

Objets de connexion : flux de séquence, flux de message, association

Couloirs : piscine ou couloir

Artefacts : objets de donnée, groupes, annotations

Voici une explication détaillée de ces différents éléments et de leur utilisation dans la description d'un processus métier : Événements

Événements

Un processus est lancé, modifié ou terminé par un déclencheur. Il existe différents types de déclencheurs, notamment un message, une minuterie, une erreur, une compensation, un signal, une annulation, une escalade ou un lien. Ces déclencheurs sont représentés par des cercles contenant différents symboles qui varient en fonction du type de déclencheur. Ils sont classés dans la catégorie « récepteur » ou « lanceur » en fonction de leur fonction.



Activité

Une activité ou une tâche exécutée par un individu ou un système est représentée par un rectangle aux coins arrondis. Ces activités peuvent être plus élaborées et intégrer des sous-processus, des boucles, des décalages et de multiples instances.



Entrée

Un point de décision qui peut modifier le flux en fonction des conditions ou des événements est représenté par des diamants. Ces points de décision peuvent être exclusifs ou inclusifs, parallèles, complexes ou pilotés par des données/des événements.




Sequence flow

La séquence des activités à exécuter est indiquée par une ligne droite fléchée. Ce flux peut être conditionnel ou suivre le chemin par défaut.



Message flow

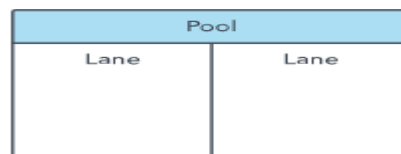
Les flux de messages illustrent le passage des messages d'une piste à une autre, traversant les frontières organisationnelles au sein d'une entreprise. Ils ne relient pas les événements ou les activités d'une même piste. Les flux de messages sont représentés par une ligne pointillée avec un cercle au début et une flèche à la fin. 

Association

Une association entre un artefact ou un texte et un événement, une activité ou un point de décision est représentée par une ligne pointillée.

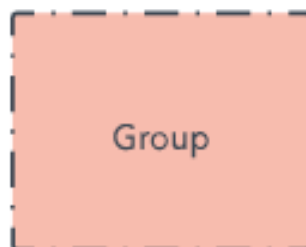
Pool and swimlane

Un pool représente les principaux participants à un processus. Un autre pool peut provenir d'une entreprise ou d'un département différent, mais toujours impliqué dans le processus. Les couloirs du pool définissent les activités et le flux correspondant à un rôle ou à un participant spécifique, en déterminant leurs responsabilités dans le cadre du processus.



Artefact

Les développeurs ajoutent des informations supplémentaires au diagramme pour fournir le niveau de détail nécessaire. Il existe trois types d'artefacts : les objets de données, les groupes ou les annotations.



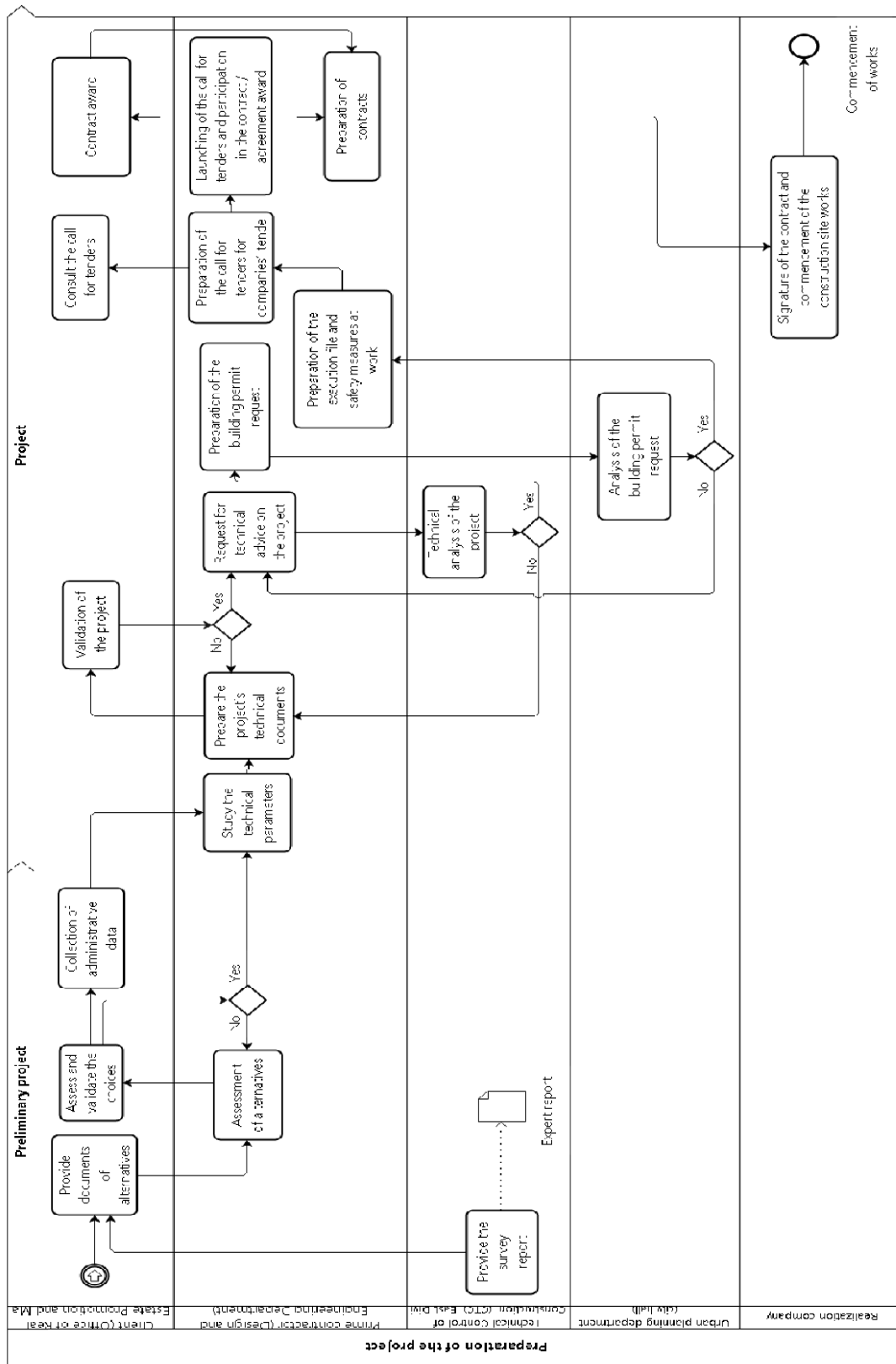


Figure V. 11 Map BPMN du processus de réhabilitation traditionnel sans BIM

Chapitre VI

Résultats et interprétation

La comparaison entre les deux diagramme de processus de réhabilitation des bâtiment, montre que dans le modèle la où nous n'avons pas introduire le processus BIM dans les différentes étapes du projet (Figure V.11), semble que le chemin entre de démarrage du projet et son réception probablement est court. Par contre le diagramme présenté dans la (Figure V.12) semble plus développé à cause de l'introduction de nouveau corps de métier comme le BIM manager, qui tiens sur sa responsabilité la gestion de la maquette BIM et la coordination entre les différents intervenants.

L'hypothèse selon laquelle 80 % de la valeur d'un projet est contenue dans seulement 20 % des éléments de la facture est appelée "éléments significatifs". De nombreux chercheurs [29]-[31] montrent que 80 % de la valeur des travaux mesurés dans un devis quantitatif est contenue dans 20 % des postes. La méthode des éléments significatifs (IS) est un moyen de développer un modèle simple en utilisant les historiques des bordereaux de quantités dans l'industrie de la construction.

IV.1. Le concept de lots de travaux

Le concept de lots de travaux consiste à combiner des éléments similaires en lots de travaux qui sont de même nature et correspondent plus étroitement aux opérations du chantier qu'à l'élément individuel[30]-[32],

Tableau IV. 1 Quantités basées sur les éléments significatifs des work packages avec leur degré de fréquence

Sw p n°	Significant work packages	Unit	Items occurrence in Project							Total Frequency	Frequency %
			1	2	3	4	5	6	7		
1	Preparation of construction sites	u	X	X		X	X	X	X	6	85,714
2	Demolition of false ceiling in reeds	m ²	X	X	X		X	X	X	6	85,714
3	Standardized structural steel profile S275J UPN 180	kg	X		X	X	X		X	5	71,429
4	Anchor with 12 mm expansion connector	u	X		X		X	X	X	5	71,429
5	Brick load-bearing wall 14 cm	m ³		X	X	X		X	X	5	71,429
6	Sloped roof Flat roof tile or channel	ml	X	X		X	X	X		5	71,429
7	Laminated timber beam 200 x 250 mm	ml	X		X		X		X	4	57,143
8	Waterproof paint and Pation finish	ml	X		X	X	X	X		5	71,429
9	Lime plaster	ml		X	X	X		X	X	5	71,429
10	Sealing and bathroom finishing	ml	X	X		X	X		X	5	71,429
11	Wooden floor demolishing	M ²	X	X			X	X		4	57,143
12	Plastering with cement mortar	ml		X		X		X	X	4	57,143
13	Reinforced concrete for raft of = 15	m ³	X		X		X		X	4	57,143

Chapitre VI. Résultats et interprétation

	cm							
14	Door and window to housing	u	X	X	X	X	4	57,143
15	Plasterboard false plasterboard + thermal insulation	ml	X	X	X	X	4	57,143
16	UPN 160 For Bearing	kg	X		X	X	3	42,857
17	Concrete for Unidirectional Flooring	m ³		X		X	3	42,857
18	Retouching of plaster vertical siding	ml		X	X	X	3	42,857

Les lots de travaux importants du point de vue des quantités se sont avérés récurrents dans chaque facture de projet et la combinaison des éléments potentiels importants du point de vue des quantités entre les quantités et le coût du cycle de vie a été réalisée.

Les lots de travaux significatifs en termes de quantités se sont avérés récurrents dans chaque facture de projet et la combinaison des éléments potentiels identifiés comme significatifs en termes de quantités entre les quantités et le coût du cycle de vie a été effectuée. Les éléments significatifs des quantités et des coûts sont classés par ordre décroissant de leur fréquence en fonction du degré de fréquence exprimé en pourcentage. On peut observer que le degré de fréquence le plus élevé est de 85,714 % et le degré de fréquence le plus bas de 42,857 %, comme le montre le tableau 2.

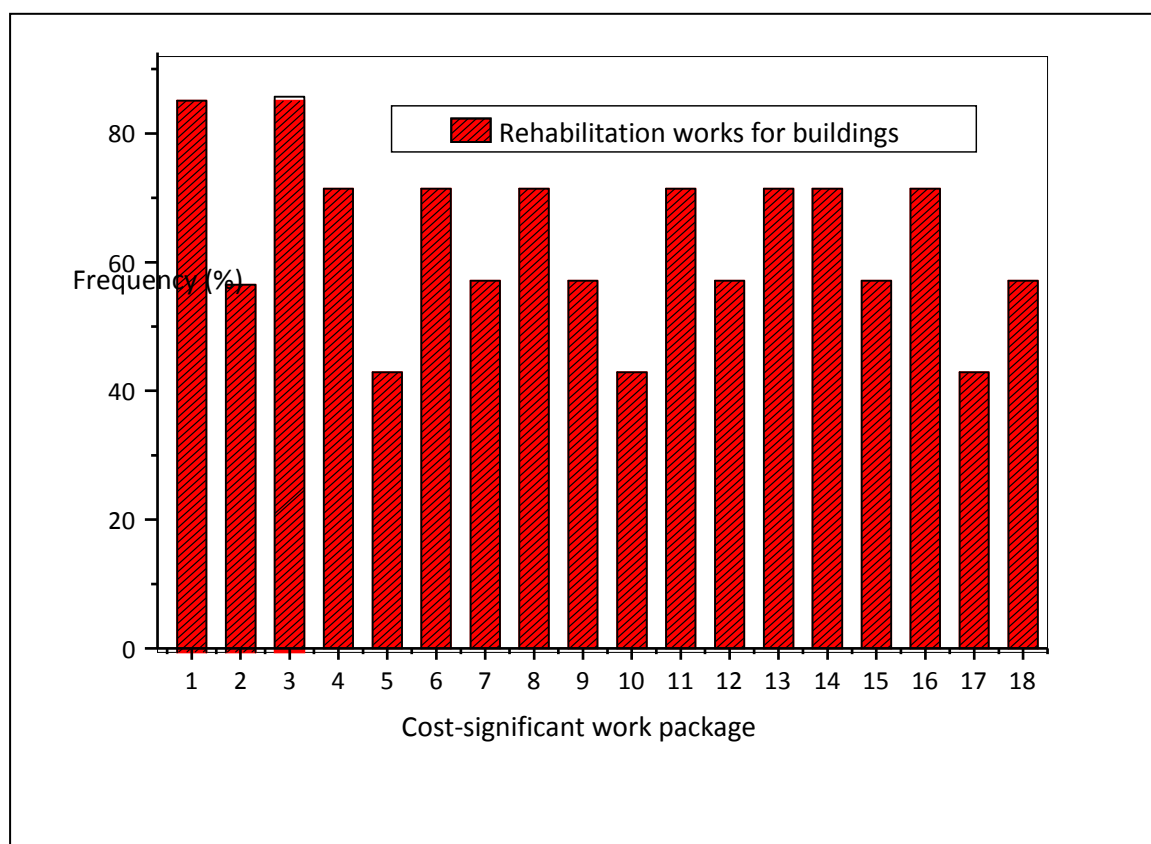


Figure IV. 1 Quantité de fréquence des éléments significatifs

IV.2. Estimation des coûts

Les deux principaux éléments d'une estimation des coûts sont le calcul des quantités et l'établissement des prix. Les quantités d'un modèle d'information sur le bâtiment basé sur des lots de travaux peuvent être extraites vers une base de données de coûts ou un fichier Excel. Les résultats de la phase de test du modèle sont présentés dans le tableau 3. Les caractéristiques du projet se sont révélées être les plus importantes pour la modélisation des informations à n'importe quel stade du cycle de vie des projets.

Tableau IV. 2 Résultat de l'estimation des quantités

v	Surface	Nombre niveau	Bill Value	Value of CSWP (DA)	Estimated CMF- 0,78	Error
1	180,2	4	14058033	10567295,58	13547814,85	-3,629
2	208,6	3	12262602,2	9965679,68	12776512,41	4,191
3	225,46	3	24059989,7	19940016,53	25564123,75	6,251
4	285,2	5	39208112,7	29966909,33	38419114,52	-2,012
5	306,45	4	42263000,4	33731578,3	43245613,2	2,325
6	325,65	6	59211112,4	46887403,1	60112055,25	1,521
7	384,26	6	71101854,5	55257262,83	70842644,65	-0,364

L'erreur d'estimation est définie comme la différence en pourcentage entre la valeur estimée, déterminée par le modèle, et la valeur réelle extraite de la facture. L'erreur d'estimation est exprimée par l'équation suivante (1)

$$\text{Erreur} = ((E_v - R_v) / R_v) * 100\% \quad (1)$$

Où ; E_v est la valeur estimée et R_v est la valeur réelle et la valeur estimée est exprimée comme suit :

$$E_v = \text{Valeur de Cswp's} / \text{Facteur de modèle}$$

On peut en déduire que plus l'erreur est faible, plus la précision est élevée. (La figure. IV.2) montre la distribution des erreurs sur chaque projet en tant que pourcentage total des estimations.

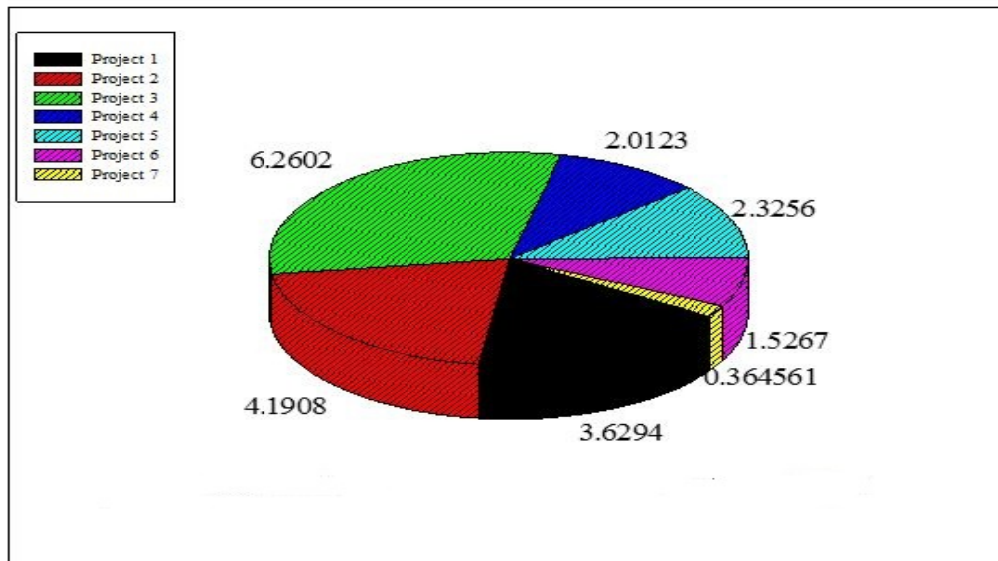


Figure IV. 2 Distribution des erreurs en pourcentage total des estimations

La validation du modèle basée sur les méthodes statistiques et les étapes de test est présentée dans (la figure IV.3). La pente est proche de 1 et l'ordonnée à l'origine est proche de 0. En outre, l'analyse de régression peut fournir la valeur du coefficient de corrélation (R2) entre la valeur réelle et la valeur estimée qui confirme la précision et l'efficacité des résultats. Cette variable mesure la variation entre la valeur réelle et le résultat estimé par le R2 qui est proche de 1, ce qui indique une bonne adéquation et une bonne linéarité.

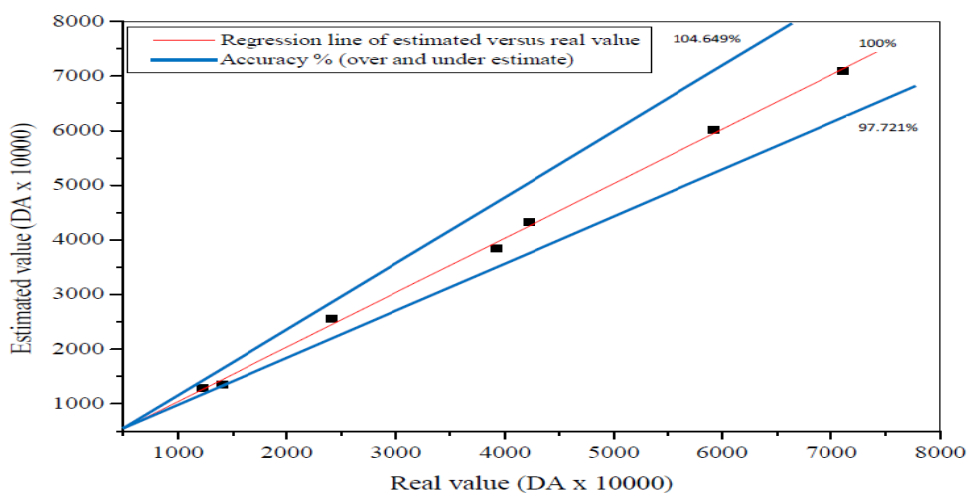


Figure IV. 3 Ligne de régression des limites supérieure et inférieure de la valeur estimée par rapport à la valeur réelle

IV.3. Précision du modèle

Cette section vise à démontrer la performance du modèle considéré par une comparaison entre la valeur réelle et la valeur estimée des projets, comme le montrent les figures IV.4 et 5. La précision totale du modèle peut être calculée comme suit :

$$ACC = \text{Erreur moyenne} \mp Sd \quad (2)$$

La précision du modèle lors de la phase de test est présentée graphiquement dans la figure IV.2. Les lignes de tendance montrent les estimations moyennes, les surestimations et les sous-estimations lors de la phase de test en fonction du calcul de la précision à l'aide de l'équation (2) ci-dessus. Lorsque la précision oscille entre 104,65 %, cela peut être interprété comme une surestimation de 4,65 %. La sous-estimation est d'environ 97,72 %, ce qui représente une économie de 2,28 % pour le propriétaire. La figure IV.2 montre la ligne de tendance de l'estimation. D'un point de vue statistique, les résidus démontrent une plus grande précision à des coûts plus élevés où les quantités sont très significatives.

IV.4. Signification du modèle

Le modèle développé peut être de la forme suivante : le coût est égal à la somme des quantités par le taux unitaire de chaque paquet divisé par le facteur du modèle. Les résultats du tracé de l'estimation sur les valeurs réelles présentées dans la figure IV.1 sont presque identiques. Les résultats obtenus ont révélé que le modèle établi a donné de meilleurs résultats en utilisant les méthodes des quantités et des coûts significatifs des lots de travaux. Les faibles valeurs de l'erreur quadratique moyenne (EQM) dans les phases de formation et de test confirment la précision des résultats.

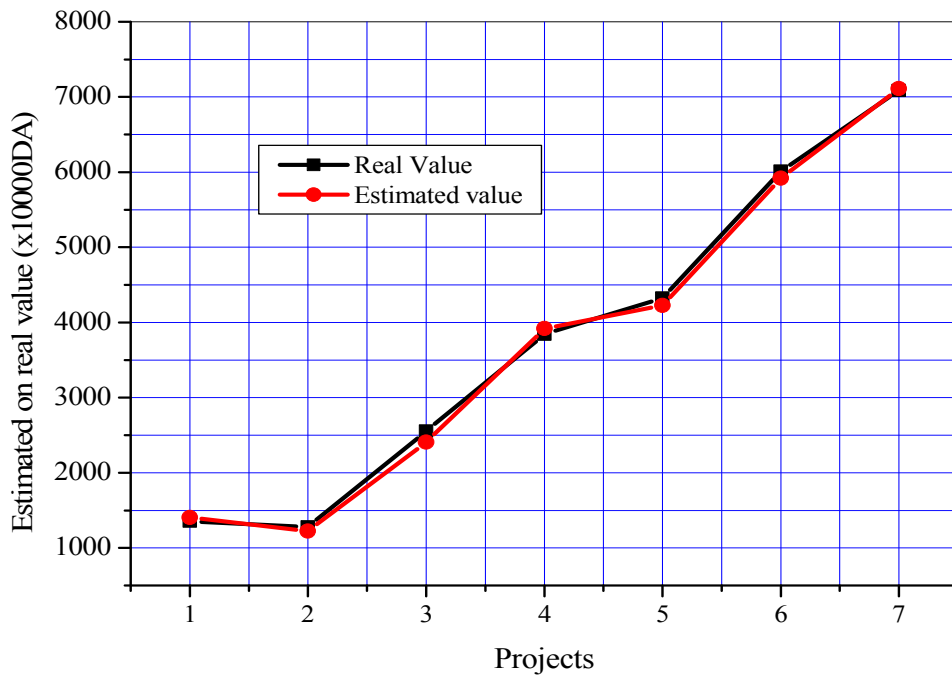


Figure IV. 4 Tracé linéaire de la valeur réelle par rapport à la valeur estimée

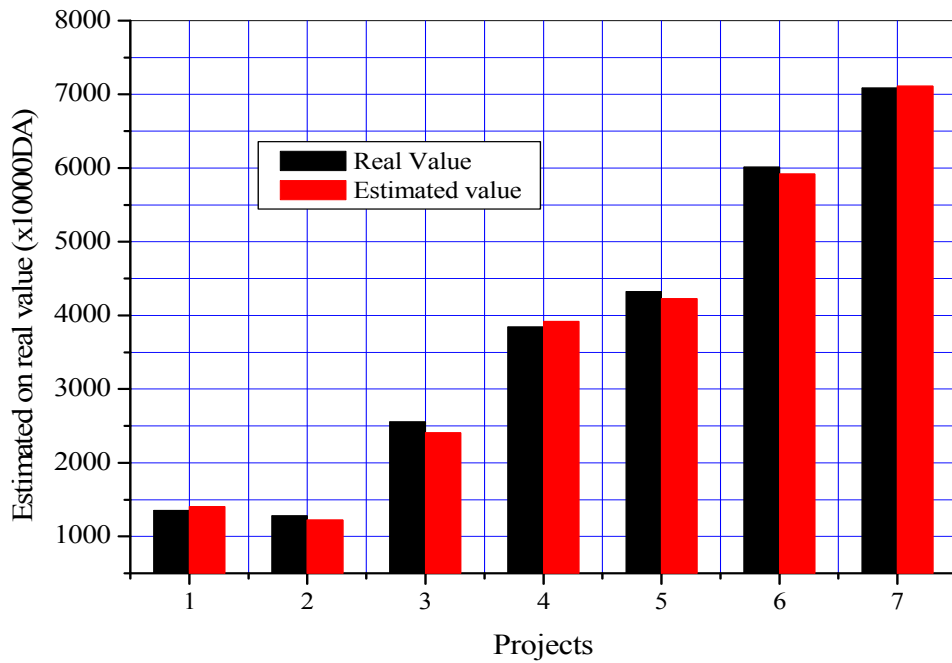


Figure IV. 5 Histogramme de la valeur réelle par rapport à la valeur estimée

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a démontré l'utilisation d'une approche d'applications mixtes pour l'optimisation de la productivité du travail dans la réhabilitation du bâtiment en lien avec la modélisation des informations du bâtiment (BIM) associée au principe des éléments significatifs apparus aux quantités et aux coûts dans l'optimisation de la productivité du travail liée à la réhabilitation du bâtiment comme cela a été démontré précédemment dans l'étude. Cependant, c'est une réussite et une avancée dans le domaine de la recherche en général et de la gestion de la construction en particulier que de lier la technologie de modélisation de l'information du bâtiment et l'intégration du principe des éléments significatifs qui font le succès d'un projet de construction.

le principe des éléments significatifs qui constituent une énorme base de données pour l'ensemble du cycle de vie de l'étude de cas. Par conséquent, cette étude devrait constituer un moyen de recherche future dans le domaine de l'estimation et de la budgétisation des projets de construction via l'application et l'intégration de la modélisation de l'information sur les bâtiments pour les projets de génie civil et de gestion de la construction.

Cependant, l'adoption de ce développement permettra de promouvoir le domaine de la gestion de la construction pour une meilleure prise de décision par les professionnels de l'industrie de la construction. Les résultats de cette étude révèlent la fiabilité et l'amélioration de la productivité du travail suite au processus de modélisation de l'information sur le bâtiment adapté dans cette étude à la réhabilitation d'un projet de construction.

REFERENCES.

- [1] E. C. Lim and J. Alum, “Construction productivity: Issues encountered by contractors in Singapore,” *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 13, no. 1, pp. 51–58, Feb. 1995, doi: 10.1016/0263-7863(95)95704-H.
- [2] F. Stankiewicz, “Productivite ou « valorite » du salarie ? Contribution au débat sur le travail,” 2002.
- [3] A. Le and C. A. S. Du, “Le renouvellement du patrimoine bâti vétuste en Algérie . Le cas du centre-ville d ’ Oran Fatima Mazouz,” 2015.
- [4] F. C. Pierre Marlin, *Collectf, Petit Larousse en couleurs*. 2009.
- [5] A. Sainte-marie and A. Sainte-marie, “L ’ application du Sénatus-Consulte du 22 avril 1863 dans la province d ’ Alger Province,” pp. 0–13, 2020.
- [6] K. M. Maha Mesaoudene, “Quelle « démocratie » participative en Algérie ?,” vol. 1, 2016, doi: 10.3917/lp.385.0061.
- [7] S. Latouche, “Sid Boubekeur , L ’ habitat en Algérie , stratégies d ’ acteurs et logiques industrielles,” pp. 472–473, 2018.
- [8] F. Mazouz, “Le renouvellement du patrimoine bâti vétuste en Algérie . Le cas du centre-ville d ’ Oran,” vol. 1, 2015, doi: 10.3917/drs.089.0151.
- [9] P. Joffroy, *La réhabilitation des logements:conserver,améliorer, restructurer les logements et les équipements*. 1999. [Online]. Available: www.editionsdumonde.com
- [10] L. Joblot, “Contribution à la mise en œuvre du BIM en rénovation : Proposition d ’ un Modèle de Maturité BIM spécifique To cite this version : HAL Id : tel-02049857 l ’ École Nationale Supérieure d ’ Arts et Métiers Proposition d ’ un Modèle de Maturité BIM spécifique,” 2019.
- [11] F. H. A. & C. P. Marcelline Blanche Manjia, Ursula Joyce Merveilles Nana Pettang, Pola Ouambo, Cédric Cabral Fandjio, “Integration and impact of BIM in the rehabilitation of buildings in developing countries,” *J. Decis. Syst.*, vol. 31, no. Sup 1, 2022, doi: 10.1080/12460125.2022.2074345.
- [12] A. Z. Sampaio and D. Simões, “Maintenance of Buildings Using BIM Methodology,” pp. 337–342, 2014.

- [13] F. F. S. P. Sara Silva¹, Maria João Falcão Silva², Paula Couto², *Energetic Rehabilitation of Building Toward BIM Methodology*. 2021. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-35533-3_13
- [14] Zsuzsa Besenyői, *BIM in panel buildings' rehabilitation*. 2016.
- [15] A. Z. Sampaio and D. Simoes, "Building Information Modelling Concept Applied in Maintenance of Buildings," vol. 6, no. 1, pp. 20–28.
- [16] L. P. Vallcorba, "Analysis of the advantages of BIM in construction rehabilitation," 2018.
- [17] A. Borrmann, M. König, C. Koch, and J. Beetz, "Building information modeling: Technology foundations and industry practice," *Build. Inf. Model. Technol. Found. Ind. Pract.*, pp. 1–584, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-92862-3.
- [18] A. Borrmann and E. Rank, "Specification and implementation of directional operators in a 3D spatial query language for building information models," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 23, no. 1, pp. 32–44, 2009, doi: 10.1016/j.aei.2008.06.005.
- [19] P. T. Rafael Sacks, Charles Eastman, Ghang Lee, *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers, 3rd Edition*. 2018. doi: 978-1-119-28753-7.
- [20] L. Gimenez, J. Hippolyte, S. Robert, F. Suard, and K. Zreik, "Review : reconstruction of 3D building information models from 2D scanned plans," *J. Build. Eng.*, vol. 2, pp. 24–35, 2015, doi: 10.1016/j.jobe.2015.04.002.
- [21] A. Watson, "Digital buildings - Challenges and opportunities," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 25, no. 4, pp. 573–581, 2011, doi: 10.1016/j.aei.2011.07.003.
- [22] P. Tang, D. Huber, B. Akinci, R. Lipman, and A. Lytle, "Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques," *Autom. Constr.*, vol. 19, no. 7, pp. 829–843, 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2010.06.007.
- [23] C. Nicolle and C. Cruz, "Semantic Building Information Model and Multimedia for Facility Management," in *Web Information Systems and Technologies*, J. Filipe and J. Cordeiro, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 14–29.
- [24] G. Lee, R. Sacks, and C. M. Eastman, "Specifying parametric building object behavior (BOB) for a building information modeling system," *Autom. Constr.*, vol. 15, no. 6, pp. 758–776, 2006, doi: 10.1016/j.autcon.2005.09.009.
- [25] E. Finith, J. Ebert, and J. Moore, "Big BIM little BIM: the practical approach to Building Information Modeling integrated practice done the right way!," 2008.

- [26] A. Redmond, A. Hore, M. Alshawi, and R. West, “Exploring how information exchanges can be enhanced through Cloud BIM,” *Autom. Constr.*, vol. 24, pp. 175–183, 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2012.02.003.
- [27] F. Konrad, *Aus dem Programm Bauwesen*. 2008.
- [28] “1 Contexte et question de recherche,” no. 1, p. 1493629, 2018.
- [29] O. Celnik, E. Lebègue, G. Nagy, and C. Eyrolles, *BIM et maquette numérique*. 2015. [Online]. Available: <http://www.eyrolles.com/BTP/Livre/bim-et-maquette-numerique-9782212138368>
- [30] M. S. Bergin, “A brief history of BIM,” *Archdaily*, vol. 7, p. 12, 2012.
- [33] J. A. E.C.Lim, “No Title”.
- [34] F. Stankiewicz, “Productivite ou « valorite » du salarie ? Contribution au débat sur le travail,” 2002.
- [35] A. Le and C. A. S. Du, “Le renouvellement du patrimoine bâti vétuste en Algérie . Le cas du centre-ville d ’ Oran Fatima Mazouz,” 2015.
- [36] F. C. Pierre Marlin, *Collectif, Petit Larousse en couleurs*. 2009.
- [37] A. Sainte-marie and A. Sainte-marie, “L ’ application du Sénatus-Consulte du 22 avril 1863 dans la province d ’ Alger Province,” pp. 0–13, 2020.
- [38] K. M. Maha Mesaoudene, “Quelle « démocratie » participative en Algérie ?,” vol. 1, 2016, doi: 10.3917/lp.385.0061.
- [39] S. Latouche, “Sid Boubekeur , L ’ habitat en Algérie , stratégies d ’ acteurs et logiques industrielles,” pp. 472–473, 2018.
- [40] F. Mazouz, “Le renouvellement du patrimoine bâti vétuste en Algérie . Le cas du centre-ville d ’ Oran,” vol. 1, 2015, doi: 10.3917/drs.089.0151.
- [9] P. Joffroy, *La réhabilitation des logements:conserver,améliorer, restructurer les logements et les équipements*. 1999. [Online]. Available: www.editionsdumoniteur.com
- [41] L. Joblot, “Contribution à la mise en œuvre du BIM en rénovation : Proposition d ’ un Modèle de Maturité BIM spécifique To cite this version : HAL Id : tel-02049857 1 ’ École Nationale Supérieure d ’ Arts et Métiers Proposition d ’ un Modèle de Maturité BIM spécifique,” 2019.
- [42] F. H. A. & C. P. Marcelline Blanche Manjia, Ursula Joyce Merveilles Nana Pettang, Pola Ouambo, Cédric Cabral Fandjio, “Integration and impact of BIM in the rehabilitation of buildings in developing countries,” *J. Decis. Syst.*, vol. 31, no. Sup 1, 2022, doi: 10.1080/12460125.2022.2074345.
- [43] A. Z. Sampaio and D. Simões, “Maintenance of Buildings Using BIM Methodology,” pp. 337–342, 2014.

- [48] F. F. S. P. Sara Silva¹, Maria João Falcão Silva², Paula Couto², *Energetic Rehabilitation of Building Toward BIM Methodology*. 2021. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-35533-3_13
- [50] Zsuzsa Besenyői, *BIM in panel buildings' rehabilitation*. 2016.
- [54] A. Z. Sampaio and D. Simoes, "Building Information Modelling Concept Applied in Maintenance of Buildings," vol. 6, no. 1, pp. 20–28.
- [56] L. P. Vallcorba, "Analysis of the advantages of BIM in construction rehabilitation," 2018.
- [59] M. P. et J.-L. B. Bruno Chaudet, "La maquette numérique dans le secteur du bâtiment," *Rev. Française des Sci. l'information la Commun.*, 2016, doi: <https://doi.org/10.4000/rfsic.2044>.
- [60] ISO 29481-1:2016(en), "Building information models — Information delivery manual — Part 1: Methodology and format."
- [61] A. Borrmann, M. König, C. Koch, and J. Beetz, "Building information modeling: Technology foundations and industry practice," *Build. Inf. Model. Technol. Found. Ind. Pract.*, pp. 1–584, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-92862-3.
- [62] A. Borrmann and E. Rank, "Specification and implementation of directional operators in a 3D spatial query language for building information models," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 23, no. 1, pp. 32–44, 2009, doi: 10.1016/j.aei.2008.06.005.
- [63] P. T. Rafael Sacks, Charles Eastman, Ghang Lee, *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers, 3rd Edition*. 2018. doi: 978-1-119-28753-7.
- [65] L. Gimenez, J. Hippolyte, S. Robert, F. Suard, and K. Zreik, "Review : reconstruction of 3D building information models from 2D scanned plans," *J. Build. Eng.*, vol. 2, pp. 24–35, 2015, doi: 10.1016/j.jobe.2015.04.002.
- [66] A. Watson, "Digital buildings - Challenges and opportunities," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 25, no. 4, pp. 573–581, 2011, doi: 10.1016/j.aei.2011.07.003.
- [67] P. Tang, D. Huber, B. Akinci, R. Lipman, and A. Lytle, "Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques," *Autom. Constr.*, vol. 19, no. 7, pp. 829–843, 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2010.06.007.
- [68] C. Nicolle and C. Cruz, "Semantic Building Information Model and Multimedia for Facility Management," in *Web Information Systems and Technologies*, J. Filipe and J. Cordeiro, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 14–29.
- [69] G. Lee, R. Sacks, and C. M. Eastman, "Specifying parametric building object behavior (BOB) for a building information modeling system," *Autom. Constr.*, vol. 15, no. 6, pp. 758–776, 2006, doi: 10.1016/j.autcon.2005.09.009.
- [70] E. Finith, J. Ebert, and J. Moore, "Big BIM little BIM: the practical approach to Building Information Modeling integrated practice done the right way!," 2008.

- [71] A. Redmond, A. Hore, M. Alshawi, and R. West, "Exploring how information exchanges can be enhanced through Cloud BIM," *Autom. Constr.*, vol. 24, pp. 175–183, 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2012.02.003.
- [72] F. Konrad, *Aus dem Programm Bauwesen*. 2008.
- [73] "1 Contexte et question de recherche," no. 1, p. 1493629, 2018.
- [74] O. Celnik, E. Lebègue, G. Nagy, and C. Eyrolles, *BIM et maquette numérique*. 2015. [Online]. Available: <http://www.eyrolles.com/BTP/Livre/bim-et-maquette-numerique-9782212138368>
- [75] M. S. Bergin, "A brief history of BIM," *Archdaily*, vol. 7, p. 12, 2012.
- [76]- Khushbu, Vishwakarma., Virendra, Kumar, Paul., Sushil, Kumar, Solanki. (2022). Analysis of Key Factors Affecting Labour Productivity in Building Rehabilitation Projects. doi: 10.37628/ijstd.v5i1.901
- [78] - John, R., Lutzker., Georganne, White-Blackburn. (1979). The good productivity game: increasing work performance in a rehabilitation setting.. *Journal of Applied Behavior Analysis*, doi: 10.1901/JABA.1979.12-488
- [79]- Enno, Koehn., Steven, E., Tower. (1982). Current Aspects of Construction Rehabilitation. *Journal of the Construction Division*, doi: 10.1061/JCCEAZ.0001045
- [80]- Eul-Bum, Lee., C., W., Ibbs., John, T, Harvey., Jeffery, R., Roesler. (2001). Constructability and Productivity Analysis for Long Life Asphalt Concrete Pavement Rehabilitation Strategies.
- [82]- Pamela, L., Moriearty., Eugene, Oulvey., Karen, Lee. (2001). Work Productivity in Psychiatry. *Disease Management & Health Outcomes*, doi: 10.2165/00115677-200109100-00003
- [83]. BOUDJEMAA SAISAI, ETUDE DE LA PRODUCTIVITE DU TRAVAIL DANS L'ENTREPRISE PUBLIQUE INDUSTRIELLE EN ALGERIE (2013)
- [84]- Khushbu, Vishwakarma., Virendra, Kumar, Paul., Sushil, Kumar, Solanki. (2022). Analysis of Key Factors Affecting Labour Productivity in Building Rehabilitation Projects. doi: 10.37628/ijstd.v5i1.901

- [85]- Rusdi, Usman, Latief., N, M, Anditiaman., Ilham, Rahim., Rosmariani, Arifuddin., M., Tumpu. (2023). Labor Productivity Study in Construction Projects Viewed from Influence Factors. *Civil Engineering Journal*, doi: 10.28991/cej-2023-09-03-07
- [86]- Mohammad, Zaid, Ali. (2019). Impact of Various Aspects on Efficiency of Labour Productivity in Building Construction Project. *Social Science Research Network*, doi: 10.2139/SSRN.3375933
- [87]- Søren, Wandahl., Christina, T., Pérez., Stephanie, Salling., Hasse, H., Neve., Jon, Lerche., Steffen, Petersen. (2021). The Impact of Construction Labour Productivity on the Renovation Wave. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, doi: 10.5130/AJCEB.V21I3.7688
- [88]- Ahmet, Anil, Sezer. (2014). Contractor Monitoring of Productivity and Sustainability in Building Refurbishment.
- [89]- Perry, Forsythe. (2018). Extending and operationalizing construction productivity measurement on building projects. *Construction Management and Economics*, doi: 10.1080/01446193.2018.1480834