

REUPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB – BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil



MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme

DE MASTER EN GENIE CIVIL

Option : structures

Thème

**ETUDE D'UNE STRUCTURE EN BETON ARME
AVEC LA DEMARCHE BIM
(Building Information Modeling)**

Présenté par:

OUADFEUL Amira

Encadré par :

Encadreur : **DERBAL Ismail**

Co-encadreur : **TALBI Abdelhakim**

Promotion 2022

Remerciement

Nous remercions tout d'abord Dieu tout puissant de nos avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce travail.

Nous remercions nos très chers parents pour nous avoir donné la vie et pour des sacrifices qu'ils ont consentis pour nous avoir aider pour arriver au terme de ce travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur « DERBAL.I » pour avoir répondu positivement à notre demande de direction, pour tous ces efforts, Conseils, Remarques qui nous a apporté durant tout le semestre de projet de fin d'étude.

Sans oublier notre Co-promoteur « TALBI .A » nous lui exprimons ici nos remerciements pour son soutien constant dans les moments difficiles de notre travail.

Nous remercions aussi très sincèrement les ingénieurs de la société « CSCEC »,

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Nous remercions de fond du cœur, tous les enseignants au sein de notre département génie civil, et spécialement les enseignants de notre option « Structures ».

Nous remercions aussi l'ingénieur « LEKHAL.M.L » pour son aide précieuse tout au long de la période de stage à société « Cosider TP-M29 » dans les années précédant.

Dédicace

Avant tout grâce à Allah miséricordieux tout puissant qui ma éclairer le chemin vers cette réussite, j'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à:

Notre promoteur DERBAL.I et Co- promoteur TALBI.A pour tous les efforts et les conseils orientations durant toute la période du stage.

Ma mère à sacrifier sa pour mon bien être, et ces encouragement, en souhaitant de tout mon cœur le bon dieu de me le garder.

Mon père qui m'a toujours soutient dans le moment difficiles et pour ce sacrifice que dieu le garder pour moi. Mes chères sœurs et frères, Ils étaient pour moi, une vraie source d'inspiration.

Toute ma famille et mes amies, en leur souhaitant plus de réussite dans vie.

Surtout MANSOUR.M.L, Je te suis profondément reconnaissant pour ce que tu as fait pour moi. Une chose est sure : je n'oublierais jamais.

Tous mes enseignants tout au long descycles de mes études.

Tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la réalisationde ce modeste travail.

Résumé

Le BIM (La modélisation des informations du bâtiment) offre des avantages en matière de collaboration interdisciplinaire, de compréhension du projet et de capacité de conception.

Le but de ce travail est la conception et l'étude d'un hôtel en béton armé (RDC+7étages avec terrasse accessible) en utilisant le BIM, le projet situe dans la wilaya d'ORAN, qui est classée dans une zone sismique II selon le règlement parasismique algérien.

La stabilité de structure est assurée par des portiques contreventés par des voiles. Nous avons utilisé le logiciel « SAP2000 » pour la modélisation de la structure.

Le dimensionnement et le calcul du ferrailage (poteaux, poutres et voiles) il est basé sur le « DTR » et « Design of Concrete Structures ». Le ferrailage a été dessiné par le logiciel « REVIT ».

La création d'une nomenclature ou une quantité est nécessaire pour les ingénieurs, qui facilité d'obtenir les quantités totales des éléments. Par conséquence ont créé une nomenclature (quantité) des éléments utilisés dans la maquette structurelle qui est établies par le logiciel « REVIT » à l'aide d'outils BIM.

Cette thèse se termine par la création de la maquette numérique reliant entre les deux maquettes structurelle et architecturale pour l'intention de détecter les clashes avec le BIM collaboratif.

Le BIM et la détection des clashes ont facilité la vie des architectes en leur permettant de contrôler et de superviser différents éléments.

Mot clé : BIM : modélisation des informations du bâtiment.

Abstract

BIM (Building Information Modeling) offers advantages in cross-disciplinary collaboration, project understanding and design capability.

The purpose of this work is the design and study of a reinforced concrete hotel (ground floor + 7 floors with accessible terrace) using BIM, the project is located in the wilaya of ORAN, which is classified in a seismic zone II according to Algerian paraseismic regulations.

Structural stability is ensured by gantries braced by sails. We used the "SAP2000" software for modeling the structure.

The dimensioning and calculation of the reinforcement (columns, beams and sails) is based on the "DTR" and "Design of Concrete Structures ". The reinforcement was drawn by the "REVIT" software.

The creation of a nomenclature or a quantity is necessary for the engineers, which facilitates obtaining the total quantities of the elements. Consequently, a nomenclature (quantity) of the elements used in the structural model has been created, which is established by the "REVIT" software using BIM tools.

This thesis ends with the creation of the digital model linking between the two models structural and architectural for the intention of detecting clashes with collaborative BIM. BIM and clash detection have made life easier for architects by allowing them to control and supervise different elements.

Key word: BIM: building information modeling.

ملخص

يوفر BIM (نمذجة معلومات البناء) مزايا في التعاون متعدد التخصصات، وفهم المشروع والقدرة على التصميم. الغرض من هذا العمل هو تصميم ودراسة فندق خرساني مسلح (طابق أرضي + 7 طوابق مع شرفة يمكن الوصول إليها) باستخدام BIM ، يقع المشروع في ولاية وهران المصنفة في المنطقة الزلزالية الثانية حسب القواعد الجزائرية المضادة للزلازل. يتم ضمان الاستقرار الهيكلي من خلال الرافعات الجسرية التي تساعد الأشرطة. استخدمنا برنامج "SAP2000" لنمذجة الهيكل.

يعتمد تحديد حجم وحساب التسليح (الأعمدة، العوارض والأشرطة) على "DTR" و "Design of Concrete Structures". تم رسم التسليح بواسطة برنامج "REVIT".

يعد إنشاء قائمة مكونات الصنف أو الكمية أمرًا ضروريًا للمهندسين ، مما يسهل الحصول على الكميات الإجمالية للعناصر. وبالتالي ، تم إنشاء تسمية (كمية) للعناصر المستخدمة في النموذج الهيكلي ، والتي تم إنشاؤها بواسطة برنامج "REVIT" باستخدام أدوات BIM.

تنتهي هذه الأطروحة بإنشاء نموذج رقمي يربط بين النموذجين الهيكلي والمعماري بهدف اكتشاف الاشتباكات مع BIM التعاوني.

جعلت BIM واكتشاف الاشتباكات الحياة أسهل للمهندسين المعماريين من خلال السماح لهم بالتحكم والإشراف على العناصر المختلفة.

الكلمة الرئيسية: BIM: نمذجة معلومات البناء.

Sommaire

REMERCIEMENT

DÉDICACE

RÉSUMÉ

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LES ABRÉVIATIONS

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
I.1. INTRODUCTION.....	4
I.2. DEFINITION DU BIM	4
I.3. HISTORIQUE	6
I.4. LE PROCESSUS DU BIM	8
I.4.1. BIM dans la phase de développement de la conception	9
I.4.2. Le BIM en phase chantier	10
I.4.3. Le BIM en phase d'exploitation	11
I.5. NIVEAU DE DEVELOPPEMENT.....	11
I.6. LES DIFFERENTS NIVEAUX DU BIM	14
I.7. DIMENSIONS DU BIM.....	15
I.8. LE BIM MANAGER.....	21
I.9. LA MAQUETTE NUMÉRIQUE.....	21
I.9.1. Droit d'auteur de l'œuvre numérique.....	24
I.9.2. Outils logiciels BIM	25
I.9.3. Outils de simulation et de calculs.....	28
I.10. L'INTEROPERABILITE.....	29
I.10.1. Interopérabilité dans les logiciels BIM	30
I.11. LES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU BIM.....	31
I.11.1. Les avantage.....	31
I.11.2. Les inconvénients.....	33
I.12. LE BIM DANS LE GENIE CIVIL.....	34
I.12.1. Avantage du BIM pour le génie civil.....	34
I.12.2. Tirer le meilleur parti du BIM.....	38
I.12.3. Collection AEC	39
I.13. CONCLUSION	42
CHAPITRE II: CALCUL DE STRUCTURE.....	43
PARTIE1 : « PRESENTATION DU LA STRUCTURE ».....	44
II.1. INTRODUCTION	44
II.2. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES	44
II.3. CONCEPTION STRUCTURELLE	45

PARTIE 2 : « CARACTERISTIQUES MECANQUES DES MATERIAUX »	46
II.1. INTRODUCTION	46
II.2. LE BÉTON	46
II.3. L'ACIER	48
PARTIE 3 : « PRE-DIMENSIONNEMENT »	51
II.1. INTRODUCTION	51
II.2. PRE-DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS SECONDAIRES	51
II.3. EVALUATION DES CHARGE ET SURCHARGE	53
II.4. PRÉ-DIMENSIONNEMENT DES ÉLÉMENTS RÉSISTANTS	55
II.4.1. Pré dimensionnement des poutres	55
II.4.2. Pré dimensionnement des voiles	57
II.4.3. Pré-dimensionnement des poteaux	58
PARTIE 4 : « ETUDE DYNAMIQUE »	65
II.1. INTRODUCTION	65
II.2. MODÉLISATION DE LA STRUCTURE	65
II.3. MODÉLISATION DE LA RIGIDITÉ	65
II.3.1. Les éléments de portiques	65
II.3.2. Les voile	65
II.3.3. Les planchers	65
II.3.4. Connectivité sol/structure	65
II.4. MODÉLISATION DE LA MASSE	65
II.5. CHOIX DE LA MÉTHODE DE CALCUL	66
II.6. MÉTHODE MODALE SPECTRALE	66
II.6.1. Principe de la méthode	66
II.6.2. Hypothèse	66
II.6.3. Spectre de réponse de calcul	67
II.6.4. Résultante des forces sismiques de calcul	67
II.6.5. Calcul de la force sismique par la méthode statique équivalente	67
II.6.6. Estimation de la période fondamentale de la structure T	68
II.6.7. Facteur de qualité Q	69
II.7. RÉSULTATS DE L'ANALYSE SISMIQUE	69
II.7.1. Résultantes des forces sismiques	71
II.7.2. Vérification des déplacements inter étage	72
II.7.3. Vérification spécifique sous sollicitations normales	73
II.7.4. Justification vis-à-vis l'effet P- Δ	74
II.7.5. Justification du coefficient de comportement R	74
PARTIE 5 : « FERRAILLAGES DES ELEMENTS STRUCTURAUX »	76
II.1. INTRODUCTION	76
II.2. FERRAILLAGE DES POTEAUX	76
II.2.1. Combinaison d'actions	76
II.2.2. Calcul du ferrailage des poteaux	77
II.3. FERRAILLAGE DES POUTRES	81
II.4. FERRAILLAGE DES VOILES	85
II.4.1. Définition	85

II.4.2. Introduction de la méthode de modèle sandwich.....	85
II.4.4. Équations pour les forces de conception et correspondantes Intensités de renforcement.....	88
II.5. CONCLUSION.....	98
CHAPITRE III : APPLICATIN DU BIM.....	99
III.1. INTRODUCTION	100
III.2. CRÉER UNE NOMENCLATURE OU UNE QUANTITÉ.....	100
III.2.1. Définition.....	100
III.2.2. Les étapes pour Créer une nomenclature ou une quantité	100
III.2.3. Créer une nomenclature ou une quantité	104
III.3. LA COLLABORATION BIM	107
III.4. LA MAQUETTE NUMÉRIQUE	108
III.4.1. La maquette structurelle	108
III.4.2. La maquette architecturale.....	110
III.5. LA DÉTECTION DES CLASHES.....	111
III.5.1. Définition.....	111
III.5.2. Avantages de la détection des clashes	111
III.5.3. Les étapes de la détection des clashes	112
III.6. CONCLUSION	117
CONCLUSION GENERALE	118
RÉFÉRENCE.....	119

Liste des figures

Figure I. 1: Building Information Modeling	6
Figure I. 2: Processus du BIM	9
Figure I. 3: Courbe de distribution temps-effort	10
Figure I. 4: Progression des éléments de mur en maçonnerie de LOD 100 à 400.....	12
Figure I. 5: Niveau de représentation objet.....	13
Figure I. 6: Maturité du BIM	14
Figure I. 7: Dimensions du BIM	16
Figure I. 8: La maquette numérique à 360°	23
Figure I. 9: BIM et Maquette Numérique	24
Figure I. 10: BIM et interopérabilité.....	30
Figure II. 1: Plan d'implantation de la structure	44
Figure II. 2: Coupe sur étage en 3D de la structure	45
Figure II. 3: Diagramme Contraintes – Déformations ELU	48
Figure II. 4: Diagramme Contraintes – Déformations de l'Acier	49
Figure II. 5: Dalle à corps creux.	51
Figure II. 6: Dalle pleine.....	52
Figure II. 7: dimensions de l'acrotère	55
Figure II. 8: Coupe d'un voile en élévation	58
Figure II. 9: Section réduite du poteau	59
Figure II. 10: Disposition des voiles dans le modèle final.....	70
Figure II. 11: Ferrailage de poteau (55*55).....	81
Figure II. 12: Ferrailage de poutre sur appui (40*65).....	84
Figure II. 13: Ferrailage de poutre sur travée (40*65).....	85
Figure II. 14: statique d'un élément « modèle sandwich »	87
Figure II. 15: Maillage d'un voile.....	87
Figure II. 16: Maillage d'un voile sens Y	90
Figure II. 17: Carte graphique Ast1sup	92
Figure II. 18: Carte graphique Ast2sup	93
Figure II. 19: Les forces et les moments obtenus sur SAP2000.	94
Figure II. 20: Les forces membranaires et les efforts de ferrailage par la méthode de modèle sandwich (EXCEL).	95
Figure II. 21: les résultats des ferrillages avec la méthode de modèle sandwich (EXCEL).	96
Figure II. 22: Ferrailage de voile suivant y-y.	98
Figure III. 1: Nomenclature/Quantités	101
Figure III. 2: Nomenclatures multicatégorie.....	101
Figure III. 3: Champs d'une nomenclature.....	102
Figure III. 4: Filtre d'une nomenclature	102

Figure III. 5: Tri/Regroupement	103
Figure III. 6: Mise en forme pour une nomenclature.....	103
Figure III. 7: Affichage des nomenclatures ou une quantité.....	104
Figure III. 8: Maquette structurale (revit).....	109
Figure III. 9: La vue transversal	109
Figure III. 10: Maquette architecturale (revit).....	110
Figure III. 11: La vue longitudinal	111
Figure III. 12: Onglet Lier Revit.....	112
Figure III. 13: Lier les maquettes.....	112
Figure III. 14: La maquette numérique	113
Figure III. 15: Exécuter la vérification des interférences	113
Figure III. 16: Catégorie depuis un projet.....	114
Figure III. 17: Rapport sur les interférences	114
Figure III. 18: Onglet d'identifiant	115
Figure III. 19: Affichage de détection des clashes.....	115
Figure III. 20: Affichage de détection des clashes.....	116
Figure III. 21: La détection des clashes en 2D.....	116
Figure III. 22: Affichage de détection des clashes.....	117
Figure III. 23: Détection des clashes	117

Liste des tableaux

Tableau II. 1: Evaluation des charges du plancher corps creux terrasse.....	53
Tableau II. 2: Evaluation des charges du plancher corps creux courant.....	54
Tableau II. 3: Evaluation des charges de la dalle pleine	54
Tableau II. 4: Evaluation de charge de la maçonnerie	54
Tableau II. 5: Evaluation des Charges d'exploitation.....	55
Tableau II. 6: Dimensions finales des poutres	57
Tableau II. 7: Dégressio n des surcharges d'exploitation.	61
Tableau II. 8: Descente de charge du poteau central	62
Tableau II. 9: Choix de sections des poteaux centraux.....	63
Tableau II. 10: Récapitulatif des dimensions des poteaux.....	64
Tableau II. 11: Calcul du facteur de qualité.....	69
Tableau II. 12: Périodes et Taux de Participation Massique.....	70
Tableau II. 13: Vérification des déplacements inter étages x-x.....	72
Tableau II. 14: Vérification des déplacements inter étages y-y.....	72
Tableau II. 15: Vérification de l'effort normal réduit (poteaux carrés).....	73
Tableau II. 16: justification vis-à-vis l'effet P- Δ X-X.....	74
Tableau II. 17: justification vis-à-vis l'effet P- Δ Y-Y.....	74
Tableau II. 18: Pourcentage des efforts tranchants	75
Tableau II. 19: Calcul du ferrailage des poteaux carrés	77
Tableau II. 20: Calcul du ferrailage des poteaux avec voile.....	77
Tableau II. 21: Choix d'armatures verticales des poteaux.....	77
Tableau II. 22: Choix d'armatures verticales des poteaux.....	78
Tableau II. 23: Vérification des contraintes des poteaux à l'ELS	78
Tableau II. 24: Vérification des contraintes de cisaillement des poteaux.....	79
Tableau II. 25: Espacement des cadres des poteaux.	80
Tableau II. 26: Choix d'armatures transversales des poteaux.	80
Tableau II. 27: Ferrailage des poutres	82
Tableau II. 28: Choix d'armatures longitudinales des poutres	82
Tableau II. 29: Vérification des contraintes des poutres à l'ELS	83
Tableau II. 30: vérification de la condition de non fragilité	83
Tableau II. 31: Choix d'armatures transversales des poutres	83
Tableau II. 32: Vérification de la flèche de la poutre	84
Tableau II. 33: les forces et les moments obtenus sur SAP2000.....	91
Tableau II. 34: les forces et les moments obtenus sur SAP2000.....	97
Tableau II. 35: les résultats d'Excel.....	97
Tableau III. 1: Nomenclature des planchers	104
Tableau III. 2: Nomenclature des voiles	105
Tableau III. 3: Nomenclature des poutres.....	105
Tableau III. 4: Nomenclature des poteaux.....	106

Les abréviations

BIM: Building Information Modeling

CAO: Conception Assistée par Ordinateur

BPM: Building Product Model

GBM: Generic Building Model

LOD: Level Of Development

IFC: Industry Foundation Classes

AEC: Architecture, Engineering and Construction

MNP : Maquette Numérique de Projet

ID: IDentifiant

Introduction Générale

La modélisation des informations du bâtiment (BIM) est le processus global de création et de gestion des informations pour une ressource de construction, C'est avant tout une histoire d'entreprise et un modèle numérique qui contient des données intelligentes et structurées.

Le BIM est l'échange d'informations vulnérables tout au long de la vie d'un bâtiment ou d'une infrastructure, de sa conception à sa démolition, est souvent assimilé un logiciel ou à une technologie, il est bien que plus que cela C'est en fait une suite de processus ou méthode de travail utilisé tout au long de la conception de la construction et de l'utilisation d'un bâtiment.

Un ou plusieurs modèles virtuels 3D paramétriques intelligentes et structurées sont utilisés tout au long de la conception de la construction et même de l'utilisation d'un bâtiment.

La modélisation des informations du bâtiment (BIM) est l'un des développements les plus prometteurs dans l'industrie de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction AEC. Le but de cette démarche est le travail collaboratif entre tous les acteurs de la construction. L'utilisation d'une base de données centrale qui alimente toutes les parties du projet, et contient toutes les informations nécessaires pour construire à partir d'une maquette numérique qui simule la réalité.

Dans cette thèse, nous étudierons l'interopérabilité des logiciels de calcul de structures en béton armé avec les outils de CAO et l'impact de la perte de données lors de l'échange de modèles IFC sur le rôle des ingénieurs structure dans un processus BIM.

En fin on applique La détection des clashes BIM a révolutionné le domaine de la conception technique, de manière holistique. En donnant à chacun le pouvoir de visualiser, d'analyser et d'éliminer les conflits à l'avance, la technologie sert de bouée de sauvetage pour une industrie stressée par des milliers de problèmes.

Cette étude est devisée par trois chapitres :

Dans premier chapitre on fait une recherche bibliographique en définissant les processus des BIM et ses concepts.

Le deuxième chapitre, nous avons divisés l'étude en parties comme suit :

D'abord, nous faisons un Présentation du la structure et caractéristiques mécaniques des matériaux.

Ensuite, la Pré-dimensionnement.

Après, nous enchaînons avec l'étude dynamique qui a été réalisée par le logiciel SAP2000.

Enfin, nous terminons ce chapitre par les ferrailages des éléments structuraux.

Finalement, on applique la procédure BIM avec la maquette numérique qui ont réalisé par logiciel Revit, et on affiche la détection des clashes.

**CHAPITRE I:
RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE**

I.1. Introduction

La phase de préconception du projet de construction a une grande influence sur la définition des orientations de l'ensemble de l'entreprise et du projet. Ainsi, il est essentiel de collecter et d'analyser une énorme quantité de données liées au projet de construction. Jusqu'à présent, la phase de préconception d'un projet dépendait de l'expérience et de l'intuition des experts. Cependant, à mesure que les projets de construction deviennent plus grands et plus complexes, la quantité d'informations connexes et de données analysées augmente. Par conséquent, la nécessité se fait sentir d'un plan qui pourrait soutenir directement la phase de préconception. Dans cet article, le BIM a été suggéré comme un outil qui soutiendra la phase de préconception, et ainsi le concept et le rôle du BIM de préconception sont définis. Le cadre de la simulation BIM de préconception est composé à l'aide du modèle standard international IFC et la manière dont le système de simulation BIM de préconception peut prendre en charge le processus est illustrée.

A phase chantier comporte de multiples interactions entre tous les acteurs d'un projet, qu'il s'agisse de questions ou remarques des entreprises exécutantes, de commentaires sur l'exécution ou demandes d'information de la part des concepteurs. De nombreux documents sont échangés, une grande quantité de ces documents se basent sur le projet et sont généralement liés à un ou plusieurs composants de la maquette (quantité, matériaux...).

Le BIM aide à structurer l'information et les plateformes à connecter les acteurs et les différents types de contenus pour simplifier la navigation entre cette multitude de documents et d'informations.

Ce premier workshop chantier abordera 2 cas d'usages précis, l'extraction de quantité de la soumission au chantier et la collaboration sur site à l'aide de plateformes collaboratives : partage de maquettes et plans, échange de commentaires et remarques, partage et validation de documents.

Plusieurs solutions logicielles seront présentées avec des retours d'expérience utilisateur.

I.2. Définition du BIM

Tout d'abord BIM vient de l'anglais Building Information Modeling qui se traduit par Modélisation des Informations de la Construction. Le terme construction est ici générique et englobe bâtiments et infrastructures.

Le BIM, c'est surtout de la gestion d'informations, informations qui sont principalement véhiculées via une maquette numérique et/ou une base de données. Le BIM définit les échanges d'informations et leur utilisation tout au long de la durée de vie d'un ouvrage, de leur conception jusqu'à leur démolition, en passant par les phases de construction et d'exploitation. La maquette numérique quant à elle est une représentation digitale des caractéristiques physiques et fonctionnelles de cet ouvrage.

La norme ISO 19650-1 donne la définition suivante : utilisation d'une représentation numérique partagée d'un actif bâti pour faciliter les processus de conception, de construction et d'exploitation et former une base fiable permettant les prises de décision. Les actifs bâtis comprennent, mais sans s'y limiter, les bâtiments, les ponts, les routes, les usines.

Le BIM est souvent assimilé à un logiciel ou à une maquette numérique 3D. Il est bien plus que cela. C'est en fait une suite de processus ou méthodes de travail utilisés tout au long de la conception, de la construction et de l'exploitation d'un bâtiment. Le BIM définit qui fait quoi, comment et à quel moment.

Encore principalement utilisé en phase de conception à des fins de coordination spatiale, le BIM peine encore à être exploité à son plein potentiel qui se trouve dans le transfert et la gestion des informations issues de la conception et de la construction d'un ouvrage vers la phase d'exploitation et de maintenance.

Le succès du BIM passera par l'utilisation d'informations structurées et fiables afin de garantir des échanges sans perte et ressaisie d'informations. [1]

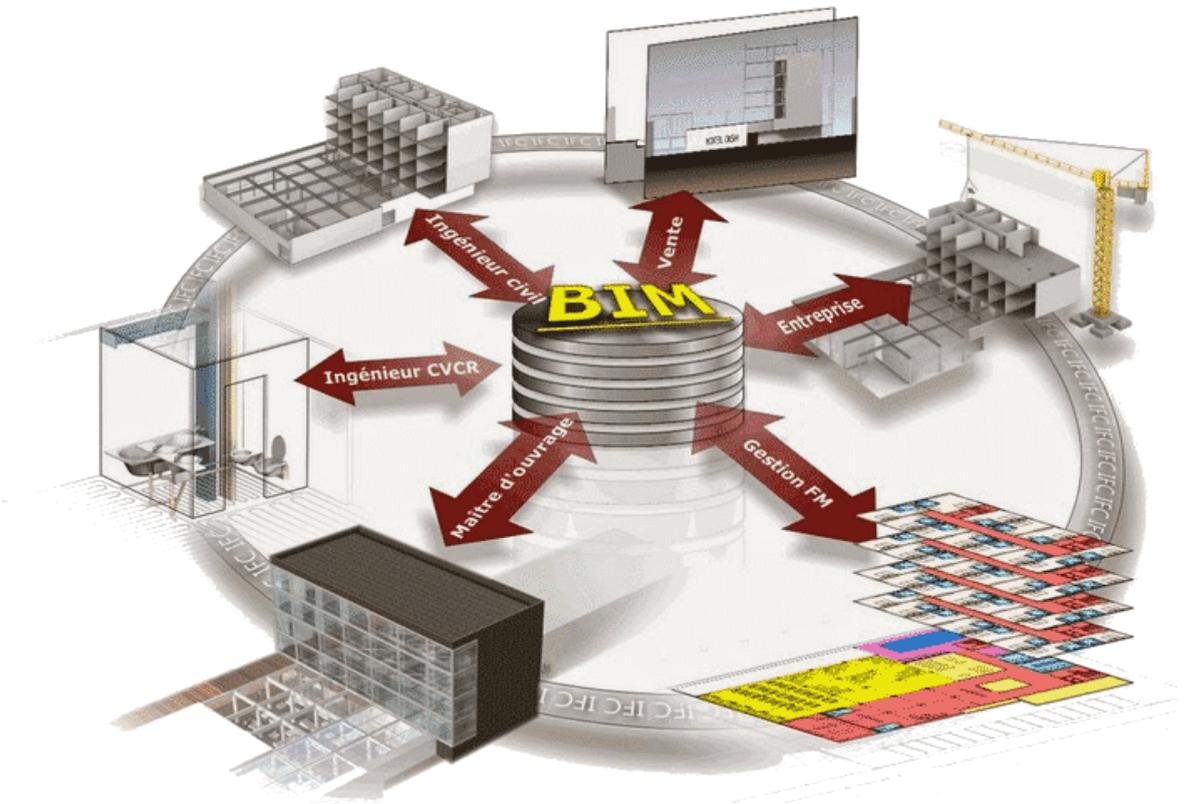


Figure I. 1: Building Information Modeling.

I.3. Historique

Le concept BIM est né du professeur Charles Eastman à la Georgia Tech School of Architecture à la fin des années 1970. Depuis son développement, il s'est élargi dans de larges perspectives. À la fin des années 1970, Eastman a affirmé que les dessins de construction étaient inefficaces en raison de sa limitation à visualiser les bâtiments et que les dessins n'étaient pas mis à jour. Par conséquent, plusieurs organisations aux États-Unis et en Finlande ont développé un programme informatique utilisant les TIC pour résoudre ces problèmes. Le développement de la définition BIM a été étendu.

En 1975, le professeur Charles Eastman avait introduit les systèmes de description des bâtiments (BDS) pour faciliter la coordination lors du développement de la conception. BDS est défini comme une base de données capable de décrire des bâtiments permettant la conception et la construction. BDS a été utilisé pour construire un modèle de systèmes physiques complexes qui consiste en la spécification d'éléments. Cependant, BDS n'a pas acquis une grande popularité car peu d'architectes ont eu la chance de s'y accrocher. En raison de la limitation de la technologie à la fin des années 1970, le BDS avait été limité à une bibliothèque individuelle et à des choix de conception potentiels tels que l'aspect

architectural, structurel ou énergétique.

Par conséquent, en 1977, le langage graphique pour la conception interactive (GLIDE) avait été introduit là où il s'incorporait à de nombreuses parties de BDS. GLIDE a été élargi Pour couvrir certains éléments du bâtiment et utilisé comme un outil pour vérifier l'exactitude de l'estimation des coûts des données et l'évaluation de la conception structurelle. Grâce à l'amélioration de GLIDE, les dessins 2D produits sont plus cohérents et précis. Cependant, BDS et GLIDE se limitent à l'implication des acteurs de la construction au stade de la conception uniquement. Afin de parvenir à une amélioration plus globale des programmes, les acteurs de la construction doivent s'impliquer et collaborer davantage dans la phase de construction. Après l'introduction du GLIDE, il a été utilisé jusqu'en 1988. Puis un nouveau programme appelé Building Product Model (BPM) est apparu en 1989. Le BPM couvrait l'application de la conception, l'estimation, le processus de construction et l'implication des acteurs de la construction. Contrairement à BDS et GLIDE, BPM a agi comme une bibliothèque de projets qui se compose d'informations sur les projets, de la planification à l'achèvement de la construction. Il s'agit d'une communication de haut niveau interprétable par ordinateur pour la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) dans la construction. En tant que tel, il peut être utilisé comme une compilation et une discussion de concepts, de technologies, de normes ainsi que de projets. Cependant, la communication sous BPM ne s'est concentrée que sur les informations sur les produits, tandis que l'industrie AEC nécessite l'intégration d'informations et de connaissances utilisées pour la gestion de la conception et de la construction.

Puis en 1995, le Generic Building Model (GBM) a été introduit en utilisant le concept de BPM. GBM a été étendu pour intégrer les informations de la conception actuelle et future qui pourraient être utilisées tout au long du cycle de vie du processus de construction. En conséquence, GBM a été en mesure d'améliorer les informations sur les projets, ce qui a amélioré l'intégration des activités de construction. Cependant, l'industrie de la construction était devenue plus complexe et plus difficile. Cela a nécessité l'adoption des TIC à grande échelle dans le but d'améliorer les performances et les attentes des projets. Par conséquent, la modélisation des informations du bâtiment (BIM) a été utilisée pour répondre aux exigences de l'industrie AEC.

En 2000, le BIM a été défini comme un modèle structuré représentant des éléments de

construction. L'utilisation du BIM a été étendue de la phase de pré-construction à la post-construction. Phase de construction. Jusqu'en 2005, il était défini comme un développement et une utilisation de logiciels informatiques pour simuler la construction et l'exploitation d'une installation.

En 2006, le BIM a été défini comme une nouvelle méthodologie pour gérer et augmenter les performances de l'AEC dans la réalisation et la gestion des projets.

En 2008, le BIM a été adapté en tant que simulation de projet consistant en un modèle tridimensionnel (3D) d'un composant du projet. Il a été lié et intégré aux informations requises tout au long des phases du projet.

De 2008 à 2013, le BIM a été élargi en tant que révolution technologique qui a contribué à transformer la façon dont les bâtiments étaient conçus, conçus, construits et exploités. L'adoption du concept BIM a été considérée comme un changement de paradigme pour l'industrie AEC qui a aidé à atteindre l'efficacité et l'efficacité dans les projets de construction. [2]

I.4. Le processus du BIM

Le BIM peut être considéré comme un processus virtuel qui englobe tous les aspects, disciplines et systèmes d'une installation au sein d'un modèle virtuel unique, permettant à tous les membres de l'équipe (propriétaires, architectes, ingénieurs, entrepreneurs, sous-traitants et fournisseurs) de collaborer plus précisément et plus efficacement, que les processus traditionnels. Au fur et à mesure que le modèle est créé, les membres de l'équipe affinent et ajustent constamment leurs portions en fonction des spécifications du projet et des modifications de conception pour s'assurer que le modèle est aussi précis que possible avant que le projet ne démarre physiquement. Les fondations du BIM reposent sur deux piliers, la communication et collaboration. La réussite de la mise en œuvre du BIM nécessite une implication précoce de toutes les parties prenantes du projet. [3]

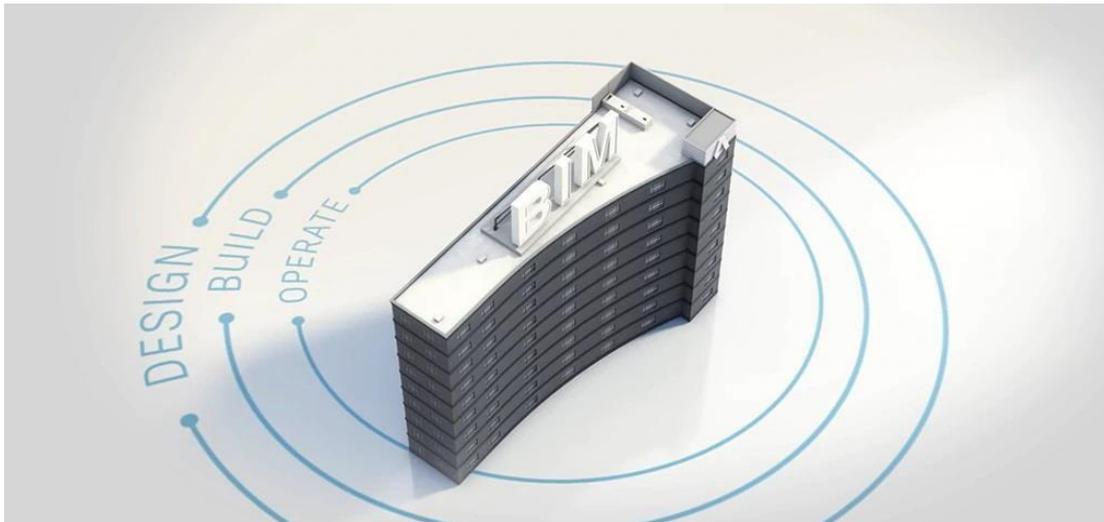


Figure I. 2: Processus du BIM.

I.4.1. BIM dans la phase de développement de la conception

Le BIM offre un grand nombre d'avantages pour le processus de conception et d'ingénierie. Par rapport aux processus 2D conventionnels, l'un des avantages les plus significatifs de l'utilisation du BIM est que la plupart des dessins techniques, tels que les coupes horizontales et verticales, sont directement dérivés du modèle et sont donc automatiquement cohérents avec l'un l'autre. La détection de collision entre les différents modèles partiels permet d'identifier et résoudre les conflits entre les disciplines de conception à un stade précoce. BIM facilite également l'intégration des calculs et des simulations de manière transparente, comme de nombreuses informations d'entrée sur la géométrie du bâtiment et les paramètres des matériaux peuvent être tirées directement du modèle. Une large gamme de simulations, y compris structurelles l'analyse, la simulation des performances du bâtiment, la simulation d'évacuation ou l'analyse de la foudre, sont alors utilisables dans le processus de conception. De plus, le modèle peut être vérifié pour la conformité aux codes et réglementations ; actuellement principalement semi-automatisé mais dans l'avenir avec un degré d'automatisation plus élevé. Enfin, les données du modèle peuvent être utilisées pour calculer un relevé de quantité très précis, fournissant la base d'estimations de coûts fiables et améliorant la précision du processus d'appel d'offres et d'appel d'offres. L'application du BIM dans le processus de planification entraîne le déplacement de l'effort de conception vers des phases antérieures. Dans les processus de planification conventionnels, le principal l'effort de conception et d'ingénierie se produit dans les phases de conception détaillées ultérieures, parfois même pendant la phase de construction proprement dite. En conséquence, la coordination détaillée des disciplines de

conception, l'intégration d'outils d'analyse et de simulation et, par conséquent, une évaluation complète de la conception du bâtiment n'intervient qu'à un stade relativement avancé du processus global. À ce stade, cependant, les possibilités de les modifications de conception sont plus limitées et aussi plus coûteuses à mettre en œuvre. Dans un processus de planification basé sur le BIM, en revanche, une grande partie de cet effort de planification peut être amené aux premières phases de conception en construisant une maquette numérique complète du bâtiment. La capacité de planifier en détail les besoins de coordination et d'utiliser des analyses informatiques dans les premières phases de conception permet d'évaluer l'impact des décisions de conception de manière plus complète et d'identifier et de résoudre les conflits possibles dès le début, ce qui réduit considérablement l'effort requis ultérieurement phases et l'amélioration de la qualité globale de la conception. [4]

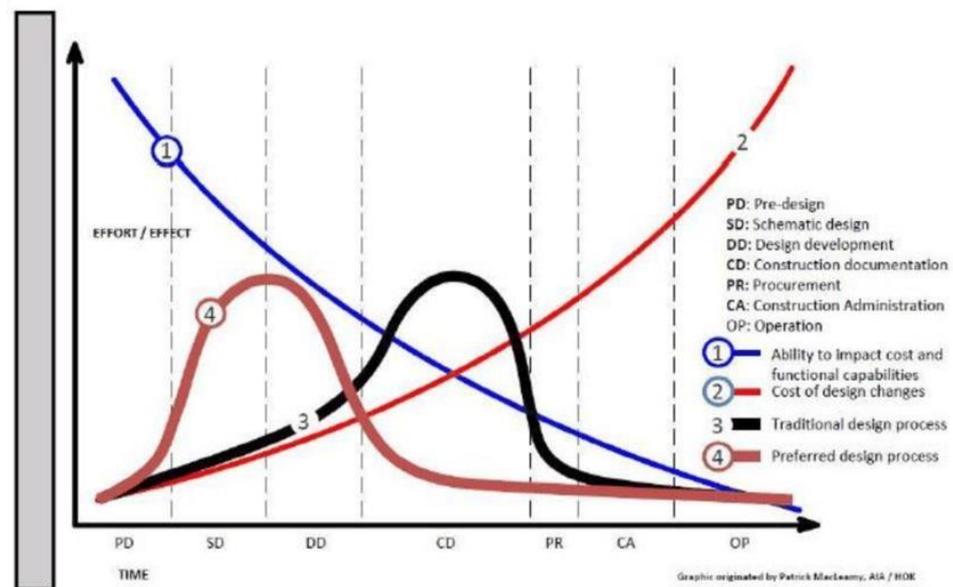


Figure I. 3: Courbe de distribution temps-effort.

I.4.2. Le BIM en phase chantier

L'application du BIM offre des avantages significatifs non seulement pour la conception d'une installation construite, mais aussi pour la préparation et l'exécution de sa construction proprement dite. Fournir la maquette numérique du bâtiment dans le cadre du processus d'appel d'offres permet de déterminer les services requis et les coûts pour les entrepreneurs lors de la préparation de l'offre et facilite également une facturation précise à un stade ultérieur. Au moyen d'un modèle d'informations sur le bâtiment 4D, qui associe les composants individuels du bâtiment aux temps de construction, la séquence de

construction peut être validée, les collisions spatiales peuvent être détectées et la logistique du site peut être organisée. Un modèle 5D intègre en outre des informations sur les coûts et peut être utilisé pour simuler l'évolution des coûts dans le temps. Enfin, la facturation des travaux de construction, ainsi que la gestion des problèmes peuvent également être pris en charge à l'aide de méthodes BIM. [4]

I.4.3. Le BIM en phase d'exploitation

D'autres avantages de la méthode BIM résultent de l'utilisation du modèle numérique de bâtiment tout au long de la phase d'exploitation relativement longue d'une installation construite. Une condition préalable essentielle est la transmission bien organisée des informations BIM de l'équipe de conception au propriétaire, y compris toutes les informations pertinentes de la phase de construction. Si le propriétaire reçoit des informations numériques de grande valeur au lieu de dessins "morts", il peut les alimenter directement dans ses systèmes de gestion des installations ou des actifs. Dans le cas des bâtiments, cela signifie que les informations sur la taille des pièces, le CVC, l'électricité et les télécommunications est directement accessible et n'a pas besoin d'être saisi manuellement. Pour l'opération d'un bâtiment, des informations sur les appareils installés, y compris les cycles de maintenance et les conditions de garantie sont particulièrement précieuses. Un aspect important est l'entretien constant de la maquette numérique du bâtiment ; tous les changements dans l'installation réelle doivent être enregistrés dans son jumeau numérique. Lorsque des rénovations ou des modifications plus importantes sont nécessaires à une date ultérieure, le modèle de bâtiment fournit une excellente base pour les activités de conception nécessaires. Lorsque l'installation construite atteint la fin de son cycle de vie et va à démolir, le jumeau numérique fournit des informations détaillées sur les matériaux utilisés dans sa construction, afin de planifier leur recyclage ou disposition. [4]

I.5. Niveau de développement

La conception des bâtiments est un processus de développement, d'élaboration et de raffinement continu. Dans les processus de planification conventionnels, l'échelle du dessin fournit une image bien établie moyen pour décrire la résolution géométrique requise pour une certaine étape du projet qui définit implicitement le degré d'élaboration, de maturité et de fiabilité des informations de conception à fournir. Comme il n'y a pas d'échelle dans le monde des modèles numériques, il a fallu trouver une analogie pour

refléter le concept de résolution géométrique et degré d'élaboration. Après le terme initialement utilisé "Niveau de détail" (tel qu'utilisé dans les domaines voisins) a été jugé trompeur car il met trop l'accent sur l'aspect géométrique, le terme « niveau de développement » (LOD) a été inventé et est maintenant largement utilisé. Un LOD définit à la fois le détail géométrique requis (également désigné par Niveau de géométrie - LOG) ainsi que les informations alphanumériques requises (également désignées par niveau d'information – LOI). Un LOD définit l'étendue des informations fournies mais donne également une indication de sa maturité et de sa fiabilité. Dans la plupart des cas, un LOD peut être associé à une phase de conception spécifique. Le BIMForum américain a défini six LOD standardisés (100, 200, 300, 350, 400, 500). [4]

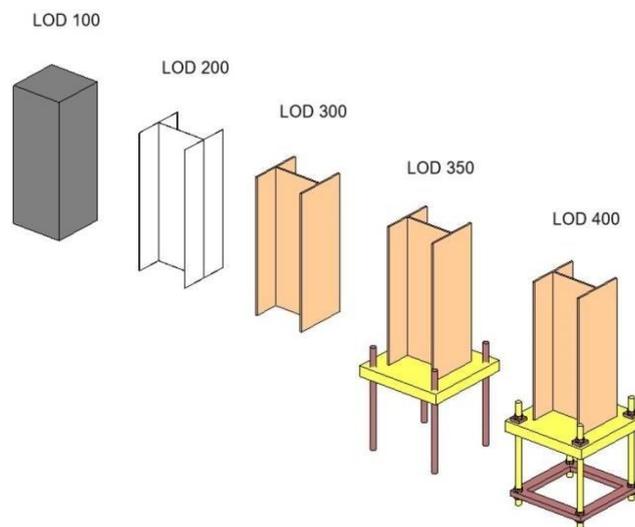


Figure I. 4: Progression des éléments de mur en maçonnerie de LOD 100 à 400.

- 1) **LOD 100 :** Les éléments LOD 100 ne sont pas des représentations géométriques. Des exemples sont des informations attachées à d'autres éléments de modèle ou des symboles montrant l'existence d'un composant mais pas sa forme, sa taille ou son emplacement précis. Toute information dérivée des éléments LOD 100 doit être considérée comme approximative. [5]
- 2) **LOD 200 :** à ce LOD, les éléments sont des espaces réservés génériques. Ils peuvent être reconnaissables aux composants qu'ils représentent, ou ils peuvent être des volumes pour la réservation d'espace. Toute information dérivée des éléments LOD 200 doit être considérée comme approximative. [5]
- 3) **LOD 300 :** La quantité, la taille, la forme, l'emplacement et l'orientation de l'élément tel que conçu peuvent être mesurés directement à partir du modèle sans faire référence à

des informations non modélisées telles que des notes ou des légendes de dimensions. L'origine du projet est définie et l'élément est localisé avec précision par rapport à l'origine du projet. [5]

4) **LOD 350** : Les pièces nécessaires à la coordination de l'élément avec des éléments proches ou attachés sont modélisées. Ces pièces comprendront des éléments tels que des supports et des connexions. La quantité, la taille, la forme, l'emplacement et l'orientation de l'élément tel que conçu peuvent être mesurés directement à partir du modèle sans faire référence à des informations non modélisées telles que des notes ou des légendes de côtes. [5]

1) **LOD 400** : Un élément LOD 400 est modélisé avec suffisamment de détails et de précision pour la fabrication du composant représenté. La quantité, la taille, la forme, l'emplacement et l'orientation de l'élément tel que conçu peuvent être mesurés directement à partir du modèle sans faire référence à des informations non modélisées telles que des notes ou des légendes de côtes. [5]

2) **LOD 500** : Étant donné que LOD 500 concerne la vérification sur le terrain et n'est pas une indication de la progression vers un niveau supérieur de géométrie d'élément de modèle ou d'informations non graphiques, cette spécification ne la définit ni ne l'illustre. [5]

Exemple de Niveau de représentation Objet

Niveau de détail	Contenu représentation	Niveau de représentation
1		Paroi représentée par un trait
2		Paroi représentée par volume simple
3		Paroi représentée par volume simple avec composition
3 bis		Paroi représentée par x éléments indépendants
4		Paroi représenté par une décomposition des x éléments en sous éléments proches de la réalité constructive
5		Paroi composée d'objets équivalents à la réalité constructive

Figure I. 5: Niveau de représentation objet.

I.6. Les différents niveaux du BIM

Une autre façon de caractériser le BIM est de définir une progression des niveaux de maturité qui exprime le degré de collaboration dans le processus ainsi que les niveaux de sophistication d'utilisation des outils individuels. De ce point de vue, le BIM est considéré comme une série d'étapes distinctes dans un voyage qui a commencé avec le dessin assisté par ordinateur et qui emmène l'industrie dans l'ère numérique. Depuis que le groupe de travail BIM du gouvernement britannique a adopté le concept de « niveaux BIM », les quatre niveaux (du niveau 0 au niveau 3) sont devenus une définition largement adoptée des critères pour qu'un projet soit jugé conforme au BIM. [6]

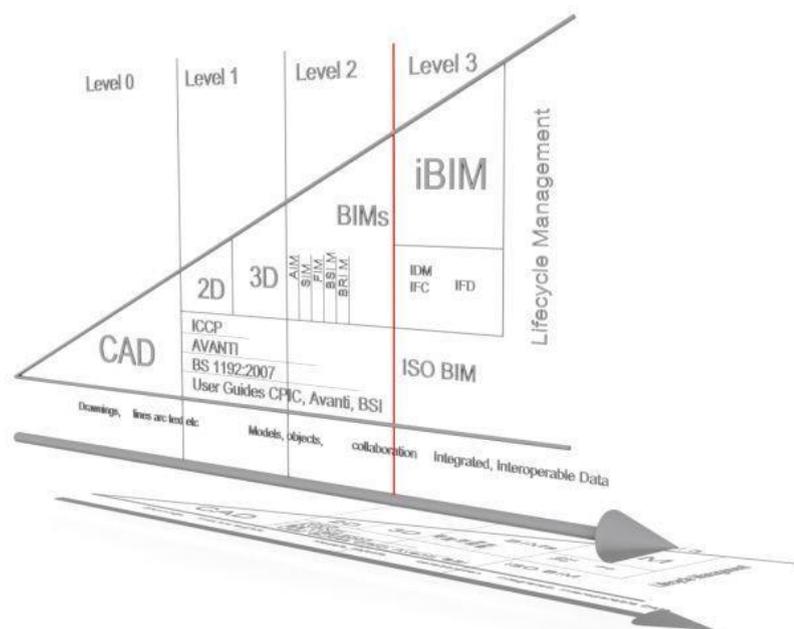


Figure I. 6: Maturité du BIM.

1) **BIM de niveau 0 :** Ce niveau est défini comme CAO non gérée. Il s'agira probablement de 2D, les informations étant partagées par des dessins papier traditionnels ou, dans certains cas, numériquement via PDF, essentiellement des sources d'informations distinctes couvrant les informations de base sur les actifs. La majorité de l'industrie est déjà bien en avance sur cela maintenant. [6]

2) **BIM niveau 1 :** C'est le niveau auquel de nombreuses entreprises opèrent actuellement. Cela comprend généralement un mélange de CAO 3D pour le travail conceptuel et de CAO 2D pour la rédaction de la documentation d'approbation statutaire et des informations de production. Les modèles ne sont pas partagés entre les membres de l'équipe de projet. [6]

3) BIM niveau 2: Cela se distingue par le travail collaboratif où toutes les parties utilisent leurs propres modèles 3D, mais elles ne travaillent pas sur un seul modèle partagé. La collaboration se présente sous la forme de la manière dont les informations sont échangées entre les différentes parties et constitue l'aspect crucial de ce niveau. Les informations de conception sont partagées via un format de fichier commun, ce qui permet à toute organisation de combiner ces données avec les siennes afin de créer un modèle BIM fédéré et d'effectuer des contrôles interrogatifs sur celui-ci. [6]

4) BIM niveau 3: Ce niveau représente une collaboration totale entre toutes les disciplines au moyen de l'utilisation d'un modèle de projet unique et partagé qui est conservé dans un référentiel centralisé (normalement une base de données d'objets dans le stockage en nuage). Toutes les parties peuvent accéder et modifier ce même modèle, et l'avantage est qu'il supprime la dernière couche de risque d'informations contradictoires. C'est ce qu'on appelle « Open BIM ». [6]

I.7. Dimensions du BIM

Le BIM est désormais une réalité : les acteurs du bâtiment sont de plus en plus exposés à des entrées et à des informations de toutes sortes concernant la numérisation et l'informatisation du secteur de la construction. Si vous n'êtes pas encore orienté à la technologie BIM.

Le BIM n'est pas seulement de la modélisation 3D mais permet de gérer de nombreuses informations liées aux matériaux, aux coûts, aux délais de construction. C'est la raison pour laquelle on parle de dimensions BIM. En effet, les 3 dimensions sont suffisantes pour répondre aux exigences de modélisation géométrique, mais pour représenter les autres domaines d'information une nouvelle approche a été introduite qui se réfère à d'autres dimensions (comme les temps, les coûts, etc.) en créant un véritable système de classification.

Les dimensions BIM se réfèrent donc aux différents niveaux d'informations d'un modèle BIM :

- 3D : modélisation tridimensionnelle;
- 4D : gestion du planning (analyse des temps);
- 5D : gestion économique (analyse des coûts);
- 6D : évaluation de la durabilité (sociale, économique et environnementale);

- 7D : gestion et facilité management;

Au-delà des 7 dimensions ci-dessus, il existe aujourd'hui un débat ouvert sur trois « nouvelles dimensions du BIM » :

- 8D : sécurité dans la phase de conception et de construction de l'ouvrage;
- 9D : construction maigre;
- 10D : industrialisation des bâtiments. [7]



Figure I. 7: Dimensions du BIM.

- **BIM 3D : uniquement de la modélisation géométrique ?**

La modélisation tridimensionnelle 3D est la première des dimensions du BIM qui permet aux professionnels de visualiser la maquette numérique de l'ouvrage en trois dimensions. Souvent, nous nous limitons à considérer le BIM comme une modélisation géométrique qui nous permet d'augmenter le détail graphique de la conception, mais ce n'est pas seulement cela. La possibilité de développer un modèle numérique du projet permet d'anticiper de nombreuses analyses de vérification à la phase de conception qui, avec les méthodes de conception traditionnelles, n'intervenaient qu'en phase d'exécution. Les avantages d'utiliser des Logiciels BIM 3D pour les architectes, les ingénieurs et les géomètres sont :

- une visualisation de l'ensemble du projet plus détaillée et précise ;
- une meilleure collaboration entre les équipes multidisciplinaires ;

- l'élimination des erreurs, des copies, des interférences, grâce à la mise à jour en temps réel du modèle ;
- l'optimisation des délais et des coûts. [7]

- **BIM 4D : gestion des temps de projet :**

Le BIM 4D (la quatrième dimension du BIM) est l'organisation des activités concernant la planification des temps de réalisation du modèle permettant d'extraire et de visualiser l'avancement des activités tout au long du cycle de vie de l'ouvrage. Les méthodes traditionnelles pour la gestion de la durée d'un chantier ou, plus généralement, d'un ouvrage (diagramme de Gantt et Pert, etc.) ont des limites et des points faibles :

- La perte d'informations dans la transmission des données du concepteur à l'entreprise.
- Le manque de communication entre la direction des travaux et les fournisseurs.
- La présence effective et le placement précis des matériaux sur le site.
- L'état d'avancement de l'ouvrage.

Le projet est décomposé en parties élémentaires spécifiquement conçues pour être liées à ce qui a été modélisé. De cette façon, il est possible de visualiser facilement l'avancement des travaux de réalisation de l'ouvrage (planning des travaux). Avec un logiciel de gestion de projet BIM (BIM 4D) les données sont liées à la représentation graphique des composants et il devient plus facile pour le project manager de consulter et de comprendre les informations du projet en obtenant une série d'avantages, notamment:

- une coordination efficace entre les architectes, les entrepreneurs et les équipes ;
- la détection des conflits à l'avance ;
- La gestion des informations relatives à l'état du chantier et la visualisation de l'impact des modifications apportées tout au long du cycle de vie. [7]

- **BIM 5D : quantité et coûts :**

La modélisation BIM 5D (la cinquième dimension du BIM) est l'activité d'estimation et d'analyse des coûts. Grâce aux logiciels BIM 5D spécifique pour le « Quantity Take Off », extraction des quantités, il est possible de créer un lien direct entre les éléments de la maquette numérique, le calcul des quantités et l'estimation des coûts. Pour les économistes de la construction l'utilisation de cette technologie présentes de nombreux avantages, notamment :

- détermine une plus grande précision et prévisibilité des estimations de coûts du projet, des variations de quantités, des matériaux, des équipements et de la main-d'œuvre;
- fournit des méthodes pour l'extraction et l'analyse des coûts et des méthodes pour l'évaluation de différents scénarios;
- permet de visualiser l'avancement des activités et des coûts correspondants dans le temps (BIM 4D);
- permet de calculer automatiquement les composants associés à un projet ;
- analyse simplifiée des coûts et analyse budgétaire avec les dépenses prévues et réelles au fil du temps. [7]

- **BIM 6D : évaluation de la durabilité :**

Le BIM 6D est lié à l'efficacité énergétique et au développement durable d'un bâtiment neuf ou existant. Le concept de durabilité peut être examiné de trois points de vue différents, en fait on parle de durabilité :

- environnemental, en termes de capacité à reproduire et à maintenir les ressources naturelles
- économique, entendu comme la faculté de générer des revenus et du travail
- social, comme générateur de bien-être pour l'homme.

La simulation BIM 6D permet une analyse exhaustive en termes de durabilité (économique, environnementale, énergétique, etc.) de l'intervention. L'analyse des performances énergétiques dès la conception apporte au concepteur les solutions techniques les plus adaptées à adopter pour assurer des consommations d'énergie inférieure, une qualité et un confort supérieurs, garantissant ainsi la durabilité du projet. L'ingénieur à l'aide d'un logiciel d'analyse et de simulation d'énergie dynamique (BIM 6D) peut bénéficier de nombreux avantages tels que :

- possibilité d'évaluer différentes solutions rapidement et avec précision;
- analyse détaillée de l'impact des différentes solutions sur les aspects économiques et opérationnels tout au long du cycle de vie de l'ouvrage ;
- une gestion plus consciente et planifiée des flux d'investissements sur l'actif. [7]

- **BIM 7D: gestion et facility management:**

Le BIM 7D correspond à la gestion opérationnelle et à la maintenance du bâtiment et de ses composants tout au long du cycle de vie. Quand on parle de cycle de vie, on ne peut

ignorer les aspects de maintenance et de démantèlement ou de restauration du bâtiment. Le logiciel 7D BIM extrait et conserve toutes les données relatives aux composants, aux spécifications, aux manuels de maintenance et d'installation, aux garanties, etc. Grâce à cette technologie, il est possible d'optimiser la gestion opérationnelle du bâtiment tout au long de son cycle de vie. Avec un logiciel BIM 7D le facilité manager peut :

- gérer le remplacement et la maintenance des actifs et des pièces de manière simple et efficace;
- faciliter les audits et assurer l'efficacité, la sécurité et le respect des normes de construction tout au long de leur cycle de vie;
- optimiser les ressources et les coûts de maintenance grâce à des systèmes de surveillance continue et toujours à jour. [7]

• **BIM 8D : la sécurité sur le chantier :**

Le BIM 8D est la dimension qui ajoute au modèle géométrique des informations relatives à la sécurité. En ajoutant ces informations au modèle, il est possible de prévoir les risques dans le processus de construction et d'identifier les activités à mettre en œuvre pour améliorer la sécurité au travail et prévenir les accidents. Avec le BIM 8D, il est possible de visualiser le chantier avant la construction, ce qui rend l'analyse de tous les scénarios possibles plus facile et plus efficace pour prévenir les dangers et les criticités. Les plus grands avantages de l'utilisation d'un logiciel de gestion de chantier BIM (BIM 8D) pour le responsable de la sécurité sont :

- avoir une vision complète des scénarios de chantier ;
- établir des plans de sécurité détaillés et toujours à jour ;
- identifier et analyser avec précision les choix de conception les plus adaptés en matière de sécurité ;
- prévenir les risques en modifiant les choix de conception qui peuvent être à la base d'éventuels dangers ;
- visualiser le chantier numérique en 3D ;
- former les travailleurs grâce à la réalité virtuelle ;
- minimiser le risque d'accidents. [7]

• BIM 9D: lean construction:

Le BIM 9D est la dimension qui permet d'optimiser et de rationaliser toutes les étapes nécessaires à la phase de construction d'un ouvrage, grâce à la numérisation des processus. La construction allégée est une approche qui permet une gestion efficace des ressources et implique de contrôler l'utilisation des matières premières afin de minimiser l'incidence des déchets. La surveillance constante de ces ressources permet de créer des stratégies pour convertir efficacement ce qui serait des déchets, des morceaux de matériaux ou de pièces en quelque chose qui ajoute de la valeur à l'ensemble. Avec un Système de gestion BIM il est également possible de gérer efficacement la dimension BIM 9D, permettant au chef de projet de :

- tirer le meilleur parti des matériaux;
- maintenir le projet de construction dans les délais et dans les limites du budget. [7]

• BIM 10D : industrialisation de la construction :

Le BIM 10D vise à industrialiser et rendre plus productif le secteur de la construction grâce aux nouvelles technologies et à l'intégration de données physiques, commerciales, environnementales ou autres. Il est possible d'atteindre l'objectif du BIM 10D grâce à l'utilisation d'outils pour la numérisation du secteur du bâtiment tels que les BIM management system ce qui permet d'aligner toutes les parties prenantes au cycle de vie de la construction et d'optimiser chaque phase. Les avantages du BIM 10D pour le projet manager sont :

- la réduction des temps de réalisation des enveloppes des bâtiments ;
- l'optimisation des coûts de chantier ;
- la valorisation et la mise en œuvre de la sécurité au travail;
- l'augmentation de la qualité de la construction grâce aux infrastructures numériques de nouvelle génération ;
- le contrôle précis de chaque élément dans chaque phase de production grâce à des processus évolués, codifiés et standardisés ;
- Aucune dépendance par rapport aux conditions météorologiques pouvant affecter les activités du site. [7]

I.8. Le BIM Manager

La fonction de BIM Manager est un métier récent qui se développe de plus en plus dans le domaine du BTP et du génie civil pour gérer le cycle de vie d'un bâtiment ou d'une infrastructure, de sa conception à sa démolition. Sorte de maquettiste numérique en chef, le ou la BIM manager a pour mission de mettre en œuvre, de gérer et de coordonner une démarche BIM, processus d'ingénierie collaborative basée sur une maquette partagée par les différents intervenants d'un projet de génie civil ou de construction. Son objectif : améliorer la gestion et le suivi d'un projet, faciliter la prise de décision tout en maîtrisant la gestion des coûts et les contraintes techniques, réglementaires et environnementales.

Le BIM manager définit en amont les règles et outils de cette plateforme collaborative (charte, mode d'intervention...) ou maîtres d'œuvre et maîtres d'ouvrage sont amenées à interagir dans leur domaine de spécialité (intégration des spécifications techniques, programmation des interventions et avancement, autorisations et réglementations...). Tout au long du projet, il. Elle veille à son optimisation, coordonne et manage les équipes à travers l'animation de réunions, établit des rapports et des synthèses techniques.

Le BIM manager travaille en collaboration avec le BIM modelleur chargé de développer la maquette numérique, le BIM coordinateur chargé de la gestion des différents modèles BIM d'un projet.

Le BIM Manager est employé au sein de bureau d'études techniques, cabinet d'architectes, de cabinets d'économistes de la construction, d'entreprises de BTP.

Le métier de BIM manager nécessite des qualités de management, d'analyse, de synthèse, de communication. Il implique également de la rigueur, de grandes facilités d'adaptation et la maîtrise des logiciels métiers. Autant de compétences qui expliquent pourquoi ce poste est généralement confié à des professionnelles expérimentées qui ont déjà une bonne approche et connaissance de la démarche BIM. [8]

I.9. La maquette numérique

La maquette numérique annonce la généralisation du Building Information Modeling (BIM), qui permet la transmission et le partage des données d'un projet entre tous ses acteurs. Pour les architectes, cela signifie garder la maîtrise de la technologie et préserver un positionnement de décideur. Retours d'expériences en agence.

L'agence d'architecture qui s'équipe de technologie pour produire une maquette numérique fait un choix stratégique : elle produit la représentation 3D du projet en vue de la traçabilité de tout son cycle de vie, de sa conception à son éventuelle démolition. Cette base de données à vocation à être partagée par les différents acteurs de la construction puis par les propriétaires du bâtiment. Une mission qui peut être encore investie par l'architecte - à condition qu'il s'en saisisse - avant que promoteurs et industriels équipés du BIM empiètent sur une partie de son rôle de prescription en imposant leurs vues.

À l'origine de son adoption, la nécessité de disposer d'un terrain de travail commun dans la collaboration à l'international. Daniela Lauret, directrice de l'agence Chapman-Taylor France a initié le processus en 2008. Elle se félicite d'avoir opté avec Revit, pour « une pensée en 3D avec une concordance plan / coupe / élévation qui autorise l'obtention d'un estimatif travail en temps réel, procurant un outil d'analyse et de synthèse qui travaille tout seul ! » Chez Brunet Saunier, Jacques Levy Bencheton, « BIM manager », indique que les projets pour lesquels ce changement s'avère le plus pertinent concernent les programmes hospitaliers, de gros volumes demandant modularité, flexibilité, évolutivité. « Avec sa capacité à réunir les 3 000 pièces nécessaires d'un concours, la maquette numérique réduit un travail d'une semaine sous AutoCAD à deux heures sous Revit », lance-t-il, ajoutant cependant que trois années d'apprentissage sont nécessaires à son usage plein et maîtrisé. Il pointe le rôle essentiel de synthèse des clashes, de contrôle de conformité de la maquette, tout au long de ses évolutions. Le paysagiste Philippe Thébaud s'est montré pionnier dans cette quête. Sa société GVA (Geo-Vision-Avenir) a été missionnée pour trois ans dans un projet au Gabon mené en maquette numérique et en BIM. Le processus a autorisé 30 à 40 personnes à travailler simultanément sur le projet, en connexion à distance faisant l'économie de déplacements. Pour donner à visualiser par des non-initiés l'évolution d'un projet de paysage, il s'est associé au Sirad pour édifier une base de données de plusieurs centaines d'espèces de plantes et végétaux, montrant leur croissance sur près de vingt ans. Si l'on estime généralement à une moyenne de 10 000 euros le budget nécessaire dans une agence pour doter une personne des outils et de la formation compatible BIM, le retour sur investissement est réel. Pascal Camliti, spécialisé dans la maison individuelle, qualifie de « spectaculaires » les effets sur sa pratique : « La conception est plus libre, le passage de l'esquisse crayon à l'ordinateur permettant de valider plusieurs hypothèses avec un calcul associé en temps réel. La vision de l'habitat est plus juste, en termes de côtes, de métrages, et l'on présente un rendu photoréaliste convaincant ». Il estime à un an et demi le temps

nécessaire aux paramétrages précis et personnalisés qui lui ont assuré une fluidité d'usage et un gain en productivité effectif.

Une étude réalisée par McGraw-Hill Construction, permet de dégager les points clés des meilleures pratiques. Elle note que l'apprentissage de « la culture BIM » est un engagement continu, qui demande de tenir une veille, une réactualisation régulière. Parmi les avantages cités des retours d'expérience, on note des améliorations significatives dans l'efficacité de la communication des idées, la qualité technique des bâtiments, la diminution des coûts de construction, le développement d'opportunités de contrat...

Olivier Celnik, architecte de l'agence Z. Studio, énonce comme l'un des moteurs du changement, le cadre légal qui se dessine à court terme. Pour lever les freins identifiés auprès de ses confrères, il affirme que le succès de la maquette numérique « tient à 20 % dans la technique et à 80 % dans l'humain ». Il est possible d'intégrer partiellement et progressivement les outils : composer en 3D, ce que propose ArchiCAD depuis près de 25 ans, faire appel à des prestations externes avant de se former, profiter du Cloud pour conserver ses capacités de mémoire...

Le BIM étant un processus créatif, il convient de savoir également le doser. Deux écueils basiques sont à éviter : si les logiciels sont de plus en plus intégratifs, il faut savoir ne pas dépasser le champ de sa spécialité. Il faut savoir aussi conserver une part de flou dans le niveau de renseignement des données sous peine de figer le projet, et pouvoir garder la liberté d'inventer ses produits plutôt que choisir du catalogue industriel. [9]

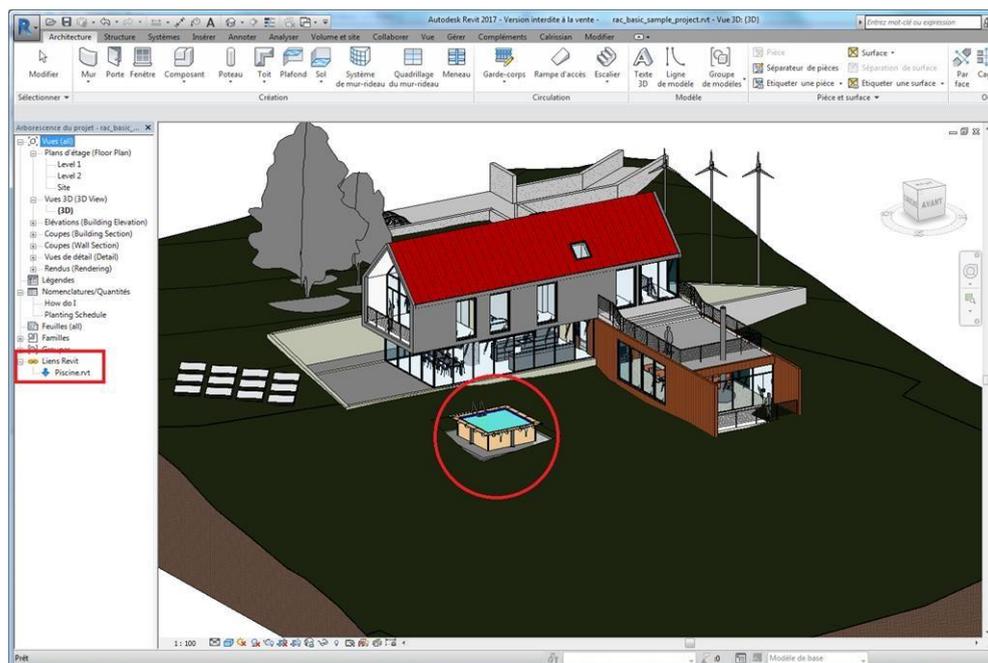


Figure I. 8: La maquette numérique à 360°.

I.9.1. Droit d'auteur de l'œuvre numérique

Cette technologie porte une nouvelle représentation de l'espace, avec des vues maquettes à 360° où il n'existe plus d'angle mort. On ne présente plus seulement l'extérieur du bâtiment, mais un mode immersif tridimensionnel proche du jeu vidéo, proposant des promenades dans des espaces immatériels. Le film projeté sur écran illustre le phénomène d'instantanéité qui est une attente croissante de la part des maîtres d'ouvrage. Un dernier paramètre induit par la technologie concerne enfin la gestion de la vitesse. Le cas particulier de l'impression 3D est significatif de ce mouvement d'accélération des processus. L'agence Pietri Architectes s'est équipée d'une imprimante de ce type en réponse à une demande de la maîtrise d'ouvrage qui n'était pas tenable par une pratique artisanale. « L'impression 3D utilisée tôt dans le projet favorise la perception et rassure », dit-il. Il qualifie cette voie d'expérimentation comme « un pas ludique mais non vital, qui deviendra une exigence pour le niveau de réalisme qu'il propose en un temps record, bien que le rendu manque de sensibilité ».

La production d'images entraîne enfin de nouvelles responsabilités : entre documents papier et numérisation, quelle pièce fera foi auprès des assurances ? Un jugement a été rendu en Suisse contre un constructeur de parking qui avait fait abattre des arbres alors qu'il les avait oubliés dans la représentation initiale de sa maquette 3D. Denis Dessus le Vice-président du CNOA pose également la question du « droit d'auteur de l'œuvre numérique - facilement reproductible - et de ses conditions d'usage et d'exploitation ». [9]

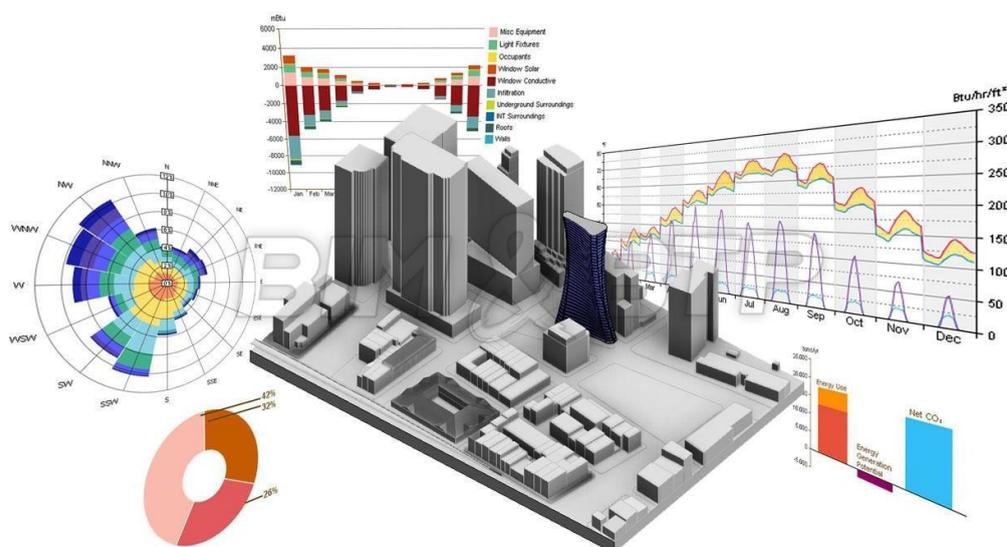


Figure I. 9: BIM et Maquette Numérique.

I.9.2. Outils logiciels BIM

Le Building Information Modeling (BIM) a révolutionné les corps de métier du bâtiment impliqués dans la conception et la réalisation de maquettes architecturales. Innovation, tests et analyses immédiates, meilleures budgétisation et communication, économies d'énergie : les avantages sont nombreux ! De nombreuses compagnies ont alors développé leur logiciel BIM pour répondre aux besoins de modernisation de ces métiers. Résumons donc les meilleurs outils actuellement disponibles sur le marché : **ArchiCAD, Revit, Dynamo BIM, BIM 360, Alplan, Tekla Structures, Edificius, BIMx, TAD, Vectorworks.** [10]

1) ArchiCAD:

ArchiCAD 23 est l'un des meilleurs logiciels BIM sur le marché. Il proposait déjà la plupart des fonctionnalités 3D et 2D dès sa sortie, et n'a cessé de se perfectionner depuis grâce à la collaboration du groupe allemande Nemetschek. Il s'adapte à différentes infrastructures, de la petite maison à la construction grande échelle. Ce logiciel offre une fonctionnalité de travail collaboratif, ce qui facilite l'échange et la communication. Par exemple, son interface DWG facilite l'échange de données avec les différents ingénieurs. Simple à prendre en main ET réaliste dans les reproductions de chaque composant, ArchiCAD est régulièrement enseigné dans les écoles d'architecture. Vous pouvez bénéficier d'une version d'essai gratuite de 30 jours. [10]



2) Revit:

Avec le logiciel Revit, le groupe Autodesk nous propose sa version de la modélisation 3D.



Cette suite d'outils n'est pas seulement dédiée aux architectes, mais plutôt à tous les corps de métiers impliqués dans la construction d'un bâtiment. Ainsi, grâce à l'utilisation d'un seul et même logiciel BIM commun, la coopération est facilitée entre toutes les disciplines. Le coût total et les ressources nécessaires d'un projet sont facilement calculables, en plus des fonctionnalités classiques de conception 3D, visualisation, documentation, etc. L'innovation principale de Revit consiste en sa modélisation de bâtiment paramétrique, qui lie tous les composants du bâtiment ensemble. Ainsi, si vous effectuez une modification sur un mur, les composants dépendants seront automatiquement modifiés pour que votre dessin demeure cohérent. Les concepteurs n'ont donc pas à redessiner tous les composants à chaque modification

substantielle. Vous pouvez commencer par télécharger une version d'essai gratuite, puis basculé ensuite sur la version payante. Attention: il ne fonctionne que sur les ordinateurs Windows. [10]

3) **Dynamo BIM:**

Le logiciel Dynamo BIM est un outil de production de dessins basés sur des paramètres prédéfinis. Produit par le groupe Autodesk, il est particulièrement utile en complément et extension de Revit. Les utilisateurs peuvent directement créer des maquettes de leurs constructions grâce à l'entrée de simples paramètres, et ce sans une ligne de code. Le tout est représenté par des noeuds au sein même d'une interface graphique. Intuitif et simple à prendre en main, ce procédé permet de créer des projets complexes en un temps record. Disponible en version gratuite et payante, les algorithmes de Dynamo BIM permettent de trouver les solutions adaptées à chaque projet. [10]



4) **BIM 360:**

Développé par le groupe Autodesk, le logiciel BIM 360 Design est un logiciel gratuit.



Complet et simple d'utilisation, il se destine autant aux étudiants qu'aux professionnels. La plupart des logiciels open source peuvent être difficiles à utiliser lorsque l'on n'est pas habitué, mais BIM 360 s'est donné pour mission de rendre ses fonctionnalités et outils les plus accessibles possible. Grâce à sa plateforme connectée et collaborative, il donne alors accès à de nombreuses données, dont des estimations de coût et de ressources pour chaque projet de construction. Vous pouvez accéder gratuitement à la version d'essai, et tester dès maintenant les outils 2D et 3D de ce logiciel BIM. [10]

5) **Tekla Structures:**

Avec la solution Trimble Connect, la suite Tekla Structures innove. Ce logiciel BIM pour



le BTP se spécialise dans la construction multimatériaux comme l'acier, le béton ou encore le bois. Elle s'adresse donc davantage aux ingénieurs structures. Sa fonctionnalité de modélisation 3D (détail 500) est appuyée par un mode collaboratif. Avec Tekla BIMSight, vous pouvez notamment partager et visualiser vos maquettes. Disponible en 17 langues, ce logiciel possède aussi une fonction de traduction pour les documents importés et exportés. Tekla Structures est également un logiciel BIM open source, qui offre des formations et un service de maintenance pour accompagner au mieux ses utilisateurs. [10]

6) Allplan:

La suite d'outils Allplan est développée par le groupe Nemetschek, connu pour le développement de logiciels BIM. Afin de répondre aux besoins de plusieurs disciplines du BTP, le logiciel se sépare en 3 composants :



- **Architecture:** pour les architectes et la génération de maquettes 3D, en prenant en compte les caractéristiques fonctionnelles et physiques des projets.
- **Engineering Building:** pour les ingénieurs structures, avec une gestion des plans, des rapports, des analyses structurelles et une prévention des conflits.
- **BIMPlus:** service de Cloud qui regroupe toutes les données créées par les deux services précédents, avec un accès en temps réel, une modification synchronisée et une visualisation du projet depuis n'importe quel appareil. [10]

7) Edificius:

Le logiciel Edificius, créé par le groupe ACCA software, est un logiciel BIM d'architecture. Avec cet outil, vous pouvez travailler sur votre projet de A à Z : concevoir, modéliser, produire, contextualiser, réaliser, etc. Du terrain aux lumières, à la création de rendus visibles en réalité virtuelle, vous donnez immédiatement vie à votre construction en quelques clics.



Les utilisateurs disposent de 5 environnements de travail, avec une bibliothèque d'objets BIM qui permet des productions dynamiques associées à une haute maîtrise d'ouvrage (coûts, performances énergétiques, interdépendances, temps, etc.).

8) BIMx:

Notre prochain logiciel BIM pour le BTP est celui de BIMx. Ce logiciel de construction en 3D et 2D est open source et propose un accès total à ses fonctionnalités.



Il est disponible en deux versions : la formule classique est gratuite, tandis que la formule pro est payante mensuellement. La seconde offre quelques fonctionnalités supplémentaires pour optimiser la gestion et la coordination de votre projet. Dans les deux formules, vous disposez de la technologie de l'Hyper-modèle BIMx, qui permet d'explorer un projet depuis tous les navigateurs Internet, et ce simplement depuis le Cloud. Compatible avec Google Cardboard VR, vous pouvez même proposer des expériences de réalité virtuelle à vos clients et collaborateurs. [10]

9) Tad – The Architect’s Desktop:

Le logiciel BIM TAD est disponible gratuitement et en open source. Directement créé pour les architectes et leurs besoins, il propose toutes les fonctionnalités nécessaires à la création de votre projet de construction. TAD se veut simple d’utilisation, réaliste et complet : vous pouvez importer et exporter des documents, travailler vite et sans vous encombrer de fantaisies inutiles, et concevoir des dessins précis. Ce qu’ils reprochent aux autres logiciels 3D ? La mise en avant de l’aspect ingénierie plutôt que de la conception architecturale propre. [10]



10) Vectorworks:

Le logiciel d’architecture Vectorworks concentre ses fonctionnalités sur le graphisme. Il est donc idéal pour les présentations ou autres compétitions en 2D ou 3D. Il est mis à jour régulièrement, ce qui lui permet d’améliorer ses capacités au fur et à mesure. Enseigné dans de nombreuses écoles et utilisé dans les bureaux d’architectes, le logiciel BIM Vectorworks possède un module de base et des extensions pour l’architecture d’intérieur ou les espaces paysagers. Les possibilités de création sont donc grandes ! De plus, tous les acteurs architecturaux peuvent s’en servir grâce à son format interchangeable. Le logiciel est payant, avec des formules d’achat par licence. [10]



I.9.3. Outils de simulation et de calculs

Parmi les logiciels métiers destinés uniquement à l’analyse et au calcul, par exemple : **ETABS**, **SAP2000**.ce sont fréquemment utilisés par les ingénieurs civils lors de la conception et l’analyse des structures. Ils collaborent entre les plateformes BIM à travers le format IFC, ils possèdent également un format (rvt) pour collaborer particulièrement avec le logiciel Revit.

1) ETABS:

Est un produit logiciel d’ingénierie qui s’adresse à l’analyse et à la conception de bâtiments à plusieurs étages. Les outils et modèles de modélisation, les prescriptions de charge basées sur le code, les méthodes d’analyse et les techniques de résolution, se coordonnent tous avec la géométrie en forme de grille unique à cette classe de structure. Les systèmes de base ou avancés dans des conditions statiques ou dynamiques peuvent être évalués à l’aide d’ETABS. Pour une



évaluation sophistiquée des performances sismiques, les analyses temporelles modales et à intégration directe peuvent être couplées aux effets P-Delta et aux grands déplacements. Des fonctionnalités intuitives et intégrées rendent les applications de toute complexité pratiques à mettre en œuvre. L'interopérabilité avec une série de plates-formes de conception et de documentation fait d'ETABS un outil coordonné et productif pour les conceptions allant de simples cadres 2D à des gratte-ciel modernes élaborés. [11]

2) SAP2000: SAP2000 :

Est un logiciel de calcul des efforts internes, Dans SAP2000, les trois premières lettres signifient Structural Analysis Program (programme d'analyse structurelle). Ce logiciel, qui en est à sa vingt-quatrième édition, est fréquemment utilisé par les ingénieurs civils lors de la conception et l'analyse de ponts, d'édifices et de barrages, etc. Le logiciel est utilisé pour les structures en béton armé, charpente métallique ou autres matériaux de construction et sous n'importe quelle forme de chargement : ponctuel, linéaire, surfacique.... Le logiciel traite plusieurs types de chargement statique (poids propre de la structure et charges d'exploitation) ou dynamique (séisme, explosion...). De plus, il dispose de plusieurs réglages pour les différentes vérifications : Eurocode, règlements américains et autres. [12]



I.10. L'interopérabilité

Dans le monde du BIM, le mot interopérabilité est souvent utilisé. Ce paragraphe explique ce que signifie ce mot à la mode et comment il se traduit dans la pratique. Il montre également non seulement les avantages d'une telle approche, mais aussi ses limites pour l'interopérabilité dans le monde du BIM. Trois des acteurs dominants ont fait des déclarations publiques sur leur stratégie d'interopérabilité BIM. Autodesk et Trimble ont publié un communiqué de presse conjoint annonçant un accord visant à accroître l'interopérabilité client afin de gagner en flexibilité tout au long du cycle de vie du projet BIM. Au cœur du communiqué de presse se trouvait le soutien d'IFC et de COBie. Deux jours plus tard, BIM a publié une interview du PDG de Bentley Systems, Greg Bentley, dans laquelle l'interopérabilité BIM était également un sujet majeur. Bentley a été moins favorable à l'IFC et au COBie, mais a toujours une solution d'interopérabilité dans l'industrie AEC. [13]

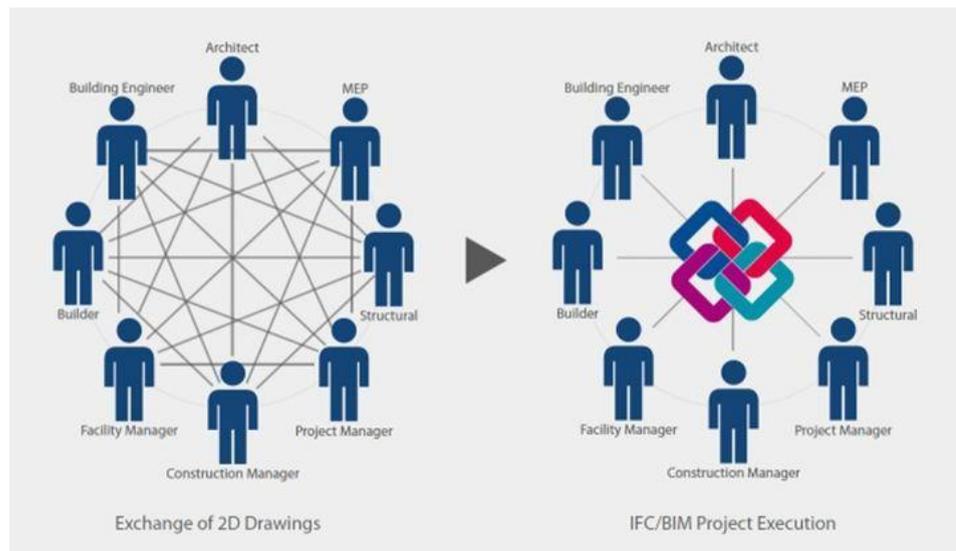


Figure I. 10: BIM et interopérabilité.

I.10.1. Interopérabilité dans les logiciels BIM

Wikipédia a un sous-chapitre séparé sur l'interopérabilité logicielle qui est un peu plus spécifique. En ce qui concerne les logiciels, le terme interopérabilité est utilisé pour décrire la capacité de différents programmes à échanger des données via un ensemble commun de formats d'échange, à lire et écrire les mêmes formats de fichiers et à utiliser les mêmes protocoles. Un cas d'utilisation courant de l'interopérabilité logicielle est la liberté pour les clients de passer d'un produit à un autre tout en conservant les données intactes après le transfert. Ceci est particulièrement important pour les cas d'utilisation où les données resteront dans un système pendant une longue période (par exemple, dans les systèmes de gestion assistée par ordinateur - CAFM) pour éviter le verrouillage du fournisseur.

Pour l'interopérabilité BIM, il existe un autre moteur tout aussi important. Dans l'industrie de la construction où des équipes de projets ponctuels sont réunies dans différentes organisations, disciplines et phases, vous souhaitez que les différents outils de discipline partagent des informations entre eux et vous souhaitez que les données générées au cours d'une phase soient utilisables sans ressaisie pour la phase suivante. . C'est la base d'openBIM. Vous ne pouvez pas avoir un véritable flux de travail openBIM sans logiciel interopérable. L'interopérabilité, c'est la liberté de travailler avec les meilleurs dans n'importe quelle discipline et pour eux d'utiliser les outils avec lesquels ils sont les plus à l'aise et les plus productifs. [13]

➤ **L'IFC :**

IFC: Industry foundation classes. Il s'agit d'un langage orienté objet utilisé par l'industrie du bâtiment pour échanger et partager des informations entre logiciels. Ce format de fichier est ouvert. Depuis mars 2013, les IFC sont labellisés ISO 16 739. Les IFC ont pour but d'assurer l'interopérabilité des logiciels métiers BIM. [14]

➤ **Classe IFC**

Les objets physiques dans un **fichier** IFC doivent être classés dans une classe d'objet, ce qui a des implications sur les propriétés que l'on attend de l'objet. Par exemple, un mur a une classe IFC IfcWall. Si votre modèle BIM a des catégorisations de classes manquantes ou incorrectes, votre modèle BIM devient difficile à utiliser. Les classes que vous pouvez utiliser sont différentes pour chaque version IFC. En général, **IFC4 a beaucoup plus de classes**, et le prochain IFC5 en inclura encore plus pour les projets d'infrastructure et de paysage. Il n'est pas conseillé d'utiliser **IFC2x3**, pour la simple raison qu'il manque de nombreuses classes IFC utiles. [14]

I.11. Les avantages et inconvénients du BIM

I.11.1. Les avantage

1) Les avantages du BIM

Les avantages du BIM sont multiples, pour tous les acteurs et à toutes les phases d'un projet. D'une manière générale les avantages suivants sont attendus du BIM:

- Meilleure gestion des informations;
- Collaboration améliorée (interne et externe);
- Meilleure communication (interne et externe);
- Augmentation de l'efficacité;
- Prise de décision facilitée;
- Permet d'optimiser et d'automatiser les méthodes de travail. [15]

2) Avantages pour les maîtres d'ouvrage et les propriétaires

Les Maîtres de l'ouvrage et autres propriétaires devraient être ceux qui retirent le plus d'avantages du BIM. Malheureusement actuellement ce n'est pas encore le cas. Une

définition claire des exigences en termes d'informations devraient leur permettre à terme de profiter enfin du plein potentiel du BIM:

- Amélioration des performances et de la durabilité des ouvrages;
- Réduction du risque financier;
- Assure le respect du programme;
- Optimise et réduit les coûts d'exploitation et de maintenance des ouvrages;
- Facilite la prise de décisions;
- Fournit un référentiel d'informations de l'actif;
- Facilite la communication autour du projet. [15]

3) Avantages pour les exploitants

Les exploitants, tout comme les propriétaires, sont actuellement ceux qui retirent le moins d'avantages du BIM, la faute à une définition des exigences lacunaire. Il faut bien avouer qu'on ne leur demande pas souvent leur avis. C'est en train de changer et ensuite ils pourront bénéficier des avantages suivants:

- Accès à l'information concernant l'intervention à distance;
- Rationalisation de la maintenance et de l'exploitation des ouvrages;
- Amélioration des standards de santé et sécurité;
- Analyses des performances effectives de l'ouvrage (jumeau numérique);
- Facilite la prise de décisions;
- Coûts d'exploitation réduits;
- Référentiel des données numériques. [15]

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 modèle de coordination;
- 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. [15]

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 les 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 peut être lié à la fabrication. [15]

I.11.2. Les inconvénients

1) Les inconvénients du BIM :

- Perte initiale du rendement ;
- Incohérences possibles entre les logiciels ;
- Investissements divers ;

- Le BIM coûte Très cher. Il faut de nouveaux logiciels, vendus une petite fortune à eux seuls, mais il faut aussi un ordinateur suffisamment puissant pour les faire fonctionner et surtout un salarié formé à cette tâche, et qu'il va peut-être même falloir recruter pour l'occasion si vous ne disposez pas en interne d'une ressource adéquate. [16]

I.12. Le BIM dans le génie civil

Le BIM pour les projets de génie civil améliore les résultats, car il permet d'étudier plusieurs scénarios. Ainsi, à partir des données collectées, les projets sont livrés dans les délais et dans le respect du budget. Le BIM permet de partager des informations tout au long du cycle de vie du projet pour produire d'excellents résultats.

La modélisation des données du bâtiment (BIM) est un processus intelligent basé sur des modèles 3D qui constitue la base de la transformation numérique. Les ingénieurs civils peuvent créer et gérer toutes les informations relatives aux ressources de conception, ce qui améliore la collaboration, le partage des données et la livraison des projets, tout en respectant les délais et les budgets.

Les projets d'infrastructure gagnent en complexité. L'emploi du BIM facilite la collaboration au sein des équipes de projet. Il permet de réduire les erreurs, d'augmenter la prévisibilité des coûts et d'améliorer la compréhension entre les parties prenantes. [17]

I.12.1. Avantage du BIM pour le génie civil

1. Donner la priorité à la constructibilité :

Mettez les outils de la Collection AEC au service de votre projet et valorisez-en toutes les étapes, depuis l'étude d'avant-projet jusqu'à la construction. Développez une direction plus positive de votre projet et minimisez les risques en considérant les conceptions dans le contexte des conditions réelles du projet. [18]

➤ Capturer les conditions existantes:

Démarrez votre projet en créant rapidement un modèle 3D intelligent à grande échelle de l'environnement issu réel de votre projet. Grâce à la Collection AEC, vous pouvez facilement regrouper d'importants volumes de données, notamment des données de capture de la réalité, de CAO 2D et raster. Vous pouvez ensuite intégrer des données SIG pour améliorer la précision et ajuster votre modèle de façon à le transformer en maillages 3D

haute définition optimisables pour une conception détaillée et un travail d'ingénierie en aval.

➤ **Passer du concept à la conception détaillée :**

Commencez par modéliser vos propositions préliminaires, puis passez à la conception détaillée pour rendre votre modèle plus précis. Dans le cadre de projets de transport, utilisez ces outils pour concevoir de manière efficace des axes routiers, puis y ajouter facilement des voies de bifurcation, des intersections et des ponts. Utilisez des outils d'analyse spécialisés pour vérifier les stationnements, les girations et les franchissements. Estimez rapidement les emprises nécessaires. Ce workflow améliore également la planification, la conception et l'analyse structurelle des ponts.

➤ **Réaliser des analyses et des simulations sur les conceptions :**

Argumentez vos propositions grâce à des outils de simulation de distance de visibilité, d'inondation, d'épure de giration, et bien plus encore. Modélisez plusieurs types de configurations d'intersection et de franchissements. Simulez le trafic à différentes heures de la journée afin de choisir les meilleures options. Déterminez de manière plus efficace les configurations des voies et les gabarits des ponts. Améliorez la gestion des eaux pluviales et créez des zones tampon. Adaptez votre projet aux évolutions des modes de déplacements et intégrez les approches multimodales.

➤ **Améliorer la coordination interdisciplinaire :**

Avec un modèle partagé, les concepteurs, maîtres d'ouvrage et sous-traitants peuvent centraliser les décisions affectant les coûts et la constructibilité. Grâce à ce modèle partagé, les maîtres d'ouvrage s'impliquent davantage tout au long du processus et les sous-traitants peuvent l'utiliser pour créer des appels d'offres renseignés, tout en minimisant les mauvaises surprises budgétaires. La gestion du phasage peut aider les membres de l'équipe à discuter des différentes approches possibles en matière de construction du projet. Grâce à une coordination plus efficace, des compromis peuvent être trouvés avant le début des travaux.

2. Améliorer les marges des projets

Les outils de la Collection AEC apportent des gains d'efficacité impossibles à obtenir avec les processus et technologies classiques. La planification avancée vous aide à définir les scénarios de conception les mieux adaptés. Un meilleur suivi des quantités tout au long

des processus permet de déterminer facilement les métrés et donc les coûts. Une approche basée sur le modèle permet de réaliser des économies tout au long de la vie d'un ouvrage. [18]

➤ **Mieux comprendre l'impact du projet :**

Chaque projet d'infrastructure cherche à monopoliser le moins de ressource possible. Avec le BIM, vous pouvez plus efficacement suivre les investissements liés à un projet. Vous pouvez par conséquent consacrer moins de temps à la gestion des coûts et vous focaliser sur l'efficacité et la valeur ajoutée du projet, ainsi que sur les parties critiques des conceptions, et optimiser les approches sociales, économiques et environnementales.

➤ **Examiner les choix de conception :**

Les concepteurs et ingénieurs en génie civil doivent avoir accès à des outils leur permettant de concevoir plusieurs scénarios avant le modèle final. La Collection AEC simplifie l'évaluation de conceptions et de planifications alternatives, ce qui vous aide à déterminer l'approche la plus efficace, la moins onéreuse et dont l'impact sur la communauté sera moindre.

➤ **Réduire le nombre d'erreurs et les oublis :**

Dans tout projet d'infrastructure, les erreurs et les oublis peuvent entraîner des retards et des corrections coûteuses. Les processus et outils BIM vous aident à identifier, à inspecter et à signaler plus efficacement les interférences dans un modèle de projet 3D. La technologie BIM vous permet d'anticiper les problèmes avant qu'ils n'affectent votre projet de construction, et de limiter ainsi les risques de dépassement de budget et de retard.

3. Prendre de meilleures décisions :

Établissez une vision d'ensemble de votre projet à l'aide d'un modèle représentant votre environnement de manière réelle et détaillée. Des visualisations et des simulations convaincantes permettent une approche intégrée entre la conception et l'analyse. Vous pouvez ainsi respecter toutes les contraintes, qu'elles soient géographiques ou financières, et assurer la conformité aux directives géométriques et en matière de sécurité. Les processus et outils BIM vous aident à prendre de meilleures décisions de conception tout au long du cycle de vie du projet. [18]

➤ **Concevoir dans un contexte réel :**

Vous pouvez rapidement créer des études d'avant-projet de votre infrastructure à l'aide d'un modèle de projet 3D intelligent, puis évaluer les différentes options lors des phases préliminaires de conception et de planification, en fonction de la vue réelle de votre projet. Utilisez des outils avancés (comme les routes composées, les vues en coupe et les dévers) pour une conception de route plus poussée, ainsi que des fonctionnalités de conception de pont étendues (comme les ponts basés sur les composants paramétriques et les analyses structurelles) afin d'améliorer l'exactitude et la précision lors de la définition des détails du modèle.

➤ **Prendre des décisions de conception plus intelligentes :**

Les outils de la Collection AEC vous permettent d'établir un contexte réaliste riche pour votre modèle, d'explorer les différentes options de conception et d'effectuer des analyses et simulations avec des visualisations proches de la réalité. Améliorez vos résultats et vos objectifs de conception tout en réduisant les risques de dépassement de budget et de retard pendant la construction. Vous pouvez mieux prévoir les performances des éléments d'infrastructure non terminés, et finaliser une documentation et une conception détaillée de manière collaborative et pluridisciplinaire.

➤ **Gérer des workflows pluridisciplinaires :**

Vous pouvez préparer de meilleures propositions de projets techniques et financiers en permettant aux membres de l'équipe de collaborer dans un environnement BIM commun et de travailler sur un modèle de conception partagé qui améliore la coordination entre sites et disciplines. Pour les projets de ponts, les concepteurs et les ingénieurs peuvent travailler directement avec le modèle pour définir les composants du pont. Avec les mêmes données de modèle, les ingénieurs structure peuvent analyser en détail les poutrelles de la superstructure et autres éléments de conception structurelle du pont. Vous pouvez utiliser le modèle final pour générer une documentation détaillée pour la révision, l'appel d'offres et la construction du pont et des routes associées.

4. Communiquer plus efficacement :

Générez des visuels attrayants de votre conception pour mieux raconter l'histoire de votre projet et valoriser ce modèle au-delà de la communication, à des fins de validation et de construction. L'équipe projet et les parties prenantes ont accès aux mêmes informations, ce qui permet d'assurer une meilleure compréhension de l'impact du projet. [18]

➤ **Remporter des contrats et accélérer le processus de validation :**

Le caractère attrayant des visualisations joue un rôle essentiel pour remporter des projets et accélérer les processus de validation. L'impact des rendus 3D, des visites virtuelles en réalité augmentée/virtuelle et des simulations de construction animées est bien plus important que celui des dessins 2D classiques. Ils peuvent considérablement améliorer la perception de votre projet. Avec des visuels qui reflètent votre projet dans le contexte de son environnement réel, vous exprimez plus clairement les résultats attendus, vous pouvez mieux vendre vos idées et obtenir plus rapidement l'approbation de votre projet.

➤ **Communiquer avec le public :**

Les projets d'infrastructure affectent le grand public, dont la préoccupation principale est de savoir si ces projets auront un impact sur la vie quotidienne. De nombreuses questions se posent : "A quoi ressemblera le projet ?", "Combien de temps durera-t-il ?" ou "Quelles seront les conséquences directes de la phase de construction ?". Certains outils simplifient la manière dont vous communiquez l'impact des projets d'infrastructure au grand public, afin de mieux expliquer l'intention du concepteur et les facteurs de coût.

➤ **Optimiser l'efficacité du projet et des équipes :**

Un modèle 3D intelligent apporte bien plus que des visualisations convaincantes pour vous aider à remporter un appel d'offres. Le modèle devient essentiel lors du processus de conception-construction. Avec un modèle BIM de votre projet, vous pouvez effectuer des simulations et des analyses 4D/5D pour revoir et communiquer les détails du projet, la planification et la logistique, ce qui optimise la coordination et la collaboration entre les membres de l'équipe, depuis la conception jusqu'à la construction.

I.12.2. Tirer le meilleur parti du BIM

1. Adapter le logiciel BIM à vos besoins

La Collection AEC représente le moyen le plus flexible et le moins coûteux d'accéder aux logiciels AutoCAD Civil 3D et InfraWorks, ainsi qu'à d'autres services et outils Autodesk qui vous permettent de développer les fonctionnalités de ces outils clés d'ingénierie civile et vos capacités à les utiliser. [18]

➤ **Accéder aux mises à jour logicielles dès leur sortie :**

Vous avez la certitude d'utiliser la dernière version optimisée de vos logiciels pour innover et développer votre expertise. Votre application de bureau Autodesk vous informe dès qu'une mise à jour est disponible. Vous choisissez les mises à jour logicielles que vous souhaitez installer, à quel moment et pour quels utilisateurs.

➤ **Utiliser les versions antérieures des logiciels :**

Vous pouvez télécharger et utiliser les versions antérieures de la plupart des logiciels Autodesk. Cette option est primordiale lorsque vous travaillez sur des fichiers de projet créés avec une version antérieure du logiciel.

➤ **Obtenir de l'aide lorsque vous en avez besoin :**

Nous vous aidons à résoudre les problèmes rapidement. Vous bénéficiez des avantages suivants :

- Accès aux spécialistes de l'assistance Autodesk;
- Accès aux forums d'assistance communautaires modérés;
- Possibilité d'accéder à des cours en ligne e-Learning et à des webcasts de formation exclusifs.

➤ **Simplifier la gestion de vos logiciels :**

En vous abonnant aux produits Autodesk, vous restez concentré sur la conception et la création, sans vous soucier de vos logiciels. Grâce à des outils d'administration conviviaux, vous pouvez gérer vos licences, vos postes et l'utilisation des logiciels de façon simple et efficace à partir de votre compte Autodesk Account.

I.12.3. Collection AEC

Le manque d'interopérabilité dans le BIM (Building Information Modeling) est reconnu par la communauté scientifique et par les acteurs de l'AEC (Architecture, Engineering and Construction), et impacte la collaboration digitale : sur le terrain, les échanges de données liées au BIM ne sont ni normés ni automatisés et conduisent à des ressaisies et pertes de données lors des itérations, entravant les flux de données et de travail. La présente thèse vise à investiguer cette double question, impliquant des considérations techniques (interopérabilité technologique : compatibilité entre modèles de données, formats) et organisationnelles (interopérabilité métier : modèles d'affaires, coopération humaine) au

sein d'une industrie fragmentée et peu numérisée. Un triple état de l'art – à travers des allers-retours entre une période récente (2013-2018), vintage (1990-2000), et brûlante (2019-2021) – révèle que ces deux pendants ne sont que trop rarement traités conjointement dans la littérature scientifique. Un levier à la fois technique et organisationnel est donc proposé afin d'améliorer l'interopérabilité BIM : un cadre collaboratif basé sur des cycles itératifs de requêtes et d'enrichissements collectifs de données. Ce cadre, qui vise à instaurer des processus de co-modélisation BIM multi-métier, est appuyé par un prototype logiciel, Treegram, permettant de fédérer et de transcrire des données BIM hétérogènes dans une base de données neutre, que les utilisateurs peuvent interroger et enrichir. Les requêtes constituant l'atome des échanges de données, la collaboration BIM s'organise autour de cycles de requêtes/vérifications/enrichissements de données. L'utilisation de Treegram sur un projet réel montre que le cadre proposé, s'il fonctionne d'un point de vue technique et améliore les flux de données, interroge les limites des modes traditionnels de production de projet dans l'AEC et soulève la question des modèles d'affaires susceptibles d'accueillir les logiques intégratives de l'ingénierie concourante et des technologies de l'industrie. [19]

➤ **Contenu de la collection AEC:**



AutoCAD et applications verticales CAD:

Plate-forme CAO commune utilisée dans l'ensemble du secteur, cette suite de produits AutoCAD vous permet de créer de la documentation, d'y accéder et de la partager avec tous les membres de l'équipe du projet. [18]



AutoCAD Civil 3D:

Logiciel BIM conçu pour améliorer la conception des infrastructures civiles et la documentation de construction. [18]



InfraWorks:

Logiciel BIM connecté au cloud pour les études d'avant-projet, l'analyse et la planification. [15]

**Revit :**

Logiciel BIM pluridisciplinaire de référence pour les études d'avant-projet, l'analyse et la planification. [18]

**ReCap Pro:**

Outil de numérisation 3D et de capture de la réalité permettant de mieux comprendre les conditions existantes et de vérifier les conditions après réalisation. [18]

**Navisworks Manage:**

Logiciel de synthèse et de révision de projets incluant des outils avancés de coordination, de détection de conflits, d'analyse 5D et de simulation. [18]

**AutoCAD Plant 3D:**

Logiciel BIM pour la tuyauterie industrielle permettant de créer des diagrammes P&ID intégrés avec la conception de tuyauterie 3D et de générer des livrables (listes de matériel, plans, coupes et isométriques). [18]

**3ds Max:**

Logiciel de rendu et de modélisation permettant de créer des scènes époustouflantes pour la visualisation de conception et des expériences de réalité virtuelle captivantes. [18]

**Structural Bridge Design:**

Outils intégrés pour le chargement, l'analyse et la vérification de la structure des ponts. [18]

**AutoCAD Map 3D:**

Logiciel de cartographie basé sur des fonctions SIG qui permet d'enrichir les données cartographiques. [18]

**Vehicle Tracking:**

Logiciel de conception et d'analyse permettant de simuler des épures de giration de véhicules sur la base d'un catalogue étendu, de concevoir des carrefours giratoires en 3D et de concevoir rapidement et dynamiquement des parkings. [18]

I.13. Conclusion

En extrayant des graphiques 3D du BIM, il peut être plus rentable, plus rapide et de meilleure qualité à produire, avec des images plus conviviales que les visites virtuelles d'installations logicielles 2D. L'expérience montre que la capacité à comprendre visuellement la conception tout au long d'un projet est l'un des plus grands avantages du processus BIM.

On peut dire que le BIM a facilité la vie des ingénieurs.

**CHAPITRE II:
CALCUL DE
STRUCTURE**

Partie1 : « Présentation du la structure »

II.1. Introduction

La structure à étudier est un hôtel en R+7étages, à usage habitation dont le lieu d'implantation est la wilaya d'Oran. Cette région est classée comme « **zone sismique II** », c'est-à-dire de sismicité moyenne selon la classification Des zones établie par le règlement Algérien RPA 99 version 2003.

Le bâtiment est un ouvrage courant d'importance moyenne selon le RPA classé « **groupe 2** ».

Le site est considéré comme un site meuble « **S3** ».

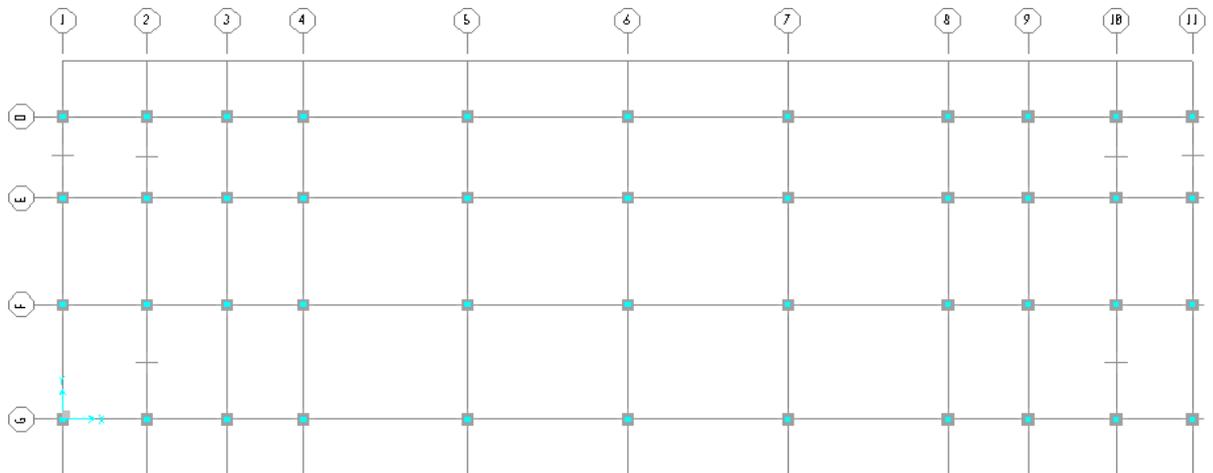


Figure II. 1: Plan d'implantation de la structure.

II.2. Caractéristiques géométriques

Les caractéristiques géométriques de l'hôtel sont :

- **Dimensions en plan :**

Largeur en plan 56.4m

Longueur en plan 15.55m

- **Dimensions en élévation :**

Hauteur du RDC5m

Hauteur étage courant 3.2m

Hauteur terrasse4m

Hauteur totale..... 28.2m

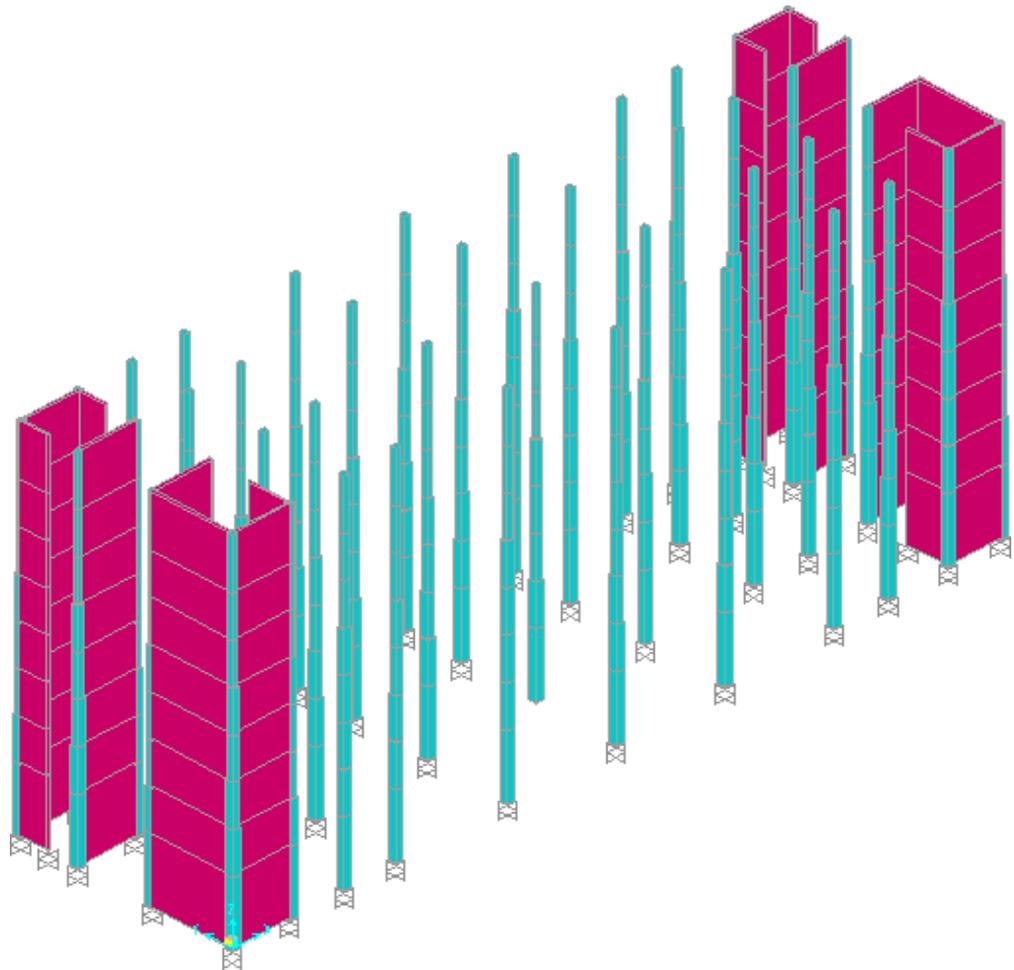


Figure II. 2: Coupe sur étage en 3D de la structure.

II.3. Conception structurelle

- **Ossature :**

En se référant au RPA 99 version 2003 qui exige que pour toutes structures dépassant une hauteur de 20m en zone II, le type de contreventement sera « **Portiques contreventés par des voiles** ».

- **Les planchers :**

Les planchers sont des éléments plans dont l'épaisseur est faible par rapport à leurs dimensions. Pour notre cas on a opté pour un plancher en corps creux pour le RDC et les étages, et un plancher en dalle pleine pour les balcons.

- **Terrasse :**

Il existe un seul type de terrasse dans le bâtiment étudié qui est accessible.

Partie2 : « Caractéristiques mécaniques des matériaux »

II.1. Introduction

Les bétons et les aciers seront choisis conformément aux règles de conception et de calcul des structures en béton armé.

II.2. Le Béton

- **Définition :**

Le béton est un matériau constitué par le mélange du ciment granulats (sable, gravillons) et d'eau de gâchage, Le béton armé est obtenu en introduisant dans le béton des aciers (armatures) disposés de manière à équilibrer les efforts de traction.

- **Composition du béton :**

Le dosage de différents constituants du béton dépend de type de matériau recherché, déterminé par ses utilisations.

En effet, ses propriétés physiques et mécaniques dépendent de sa composition et de facteurs extérieurs, tel que la température.

- 350 kg/m³ de ciment de classe CEM II
- 400 L de sable $D_g \leq 5 \text{ mm}$
- 800 L de gravillons $5 \text{ mm} \leq D_g \leq 25 \text{ mm}$
- 175 L d'eau de gâchage

- **Caractéristiques physiques et mécaniques du béton :**

- a) **Masse volumique :**

La masse volumique des bétons est comprise entre 22 et 24KN/m³. Cette masse volumique peut être augmentée avec la modalité de mise en œuvre, en particulier avec la vibration. On prendra dans notre cas une masse volumique de 25KN/m³.

- b) **Résistance du béton :**

Le béton est caractérisé par sa résistance à la compression, et sa résistance à la traction, mesurée à " j " jours d'âge.

- **Résistance à la compression :**

Désignée par f_{c28} (résistance à la compression à 28 jours), elle est obtenue par écrasement en compression axiale sur des éprouvettes cylindriques normalisées (16×32) cm² dont la hauteur est double du diamètre et leurs sections est de 200 cm². Pour les ouvrages courants, on admet une résistance caractéristique à la compression à 28 jours égale à 25 MPa.

➤ **Résistance à la traction :**

La résistance caractéristique à la traction du béton à « j » jours, notée f_{tj} , est conventionnellement définie par la relation :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj} \text{ (MPa)}$$

NB : Notre béton est caractérisé par : $f_{c28} = 25\text{MPa}$ et $f_{t28} = 2,1\text{MPa}$.

C) Déformations longitudinales du béton:

Ce module est défini sous l'action des contraintes normales d'une longue durée ou courte durée d'application.

• **Module de déformation instantanée:**

Pour des charges d'une durée d'application inférieure à 24 heures

$$E_{ij} = 11\,000 \cdot (f_{cj})^{1/3} \text{ (MPa)} \quad \text{D'où} \quad E_{ij} = 32\,164,20 \text{ MPa}$$

• **Module de déformation longitudinale différée :**

Pour des charges de longue durée d'application, on a :

$$E_{vj} = 3700 \cdot (f_{cj})^{1/3} \text{ (MPa)} \quad \text{D'où} \quad E_{vj} = 10\,818,87 \text{ MPa}$$

d) Coefficient de Poisson:

La déformation longitudinale est accompagnée par une déformation transversale, le coefficient de Poisson est le rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale.

Dans les calculs, le coefficient de Poisson est égal à :

$$\nu = 0 \quad \rightarrow \text{ Béton fissuré à L'E.L. U}$$

$$\nu = 0.2 \quad \rightarrow \text{ Béton non fissuré à L'E.L. S}$$

e) Les Contrainte Limites :

• **État limite ultime « E.L.U » :**

Le diagramme déformations contraintes de calcul pouvant être utilisé dans tous les cas est le diagramme dit « **parabole rectangle** ». La contrainte ultime du béton en compression à L'ELU,

$$\sigma_{bc} = F_{bc} = \frac{0.85 f_{c28}}{\theta \gamma_b} \text{ (MPa)}$$

- $\gamma_b = 1,5$ situation durable.
- $\gamma_b = 1$ situation accidentals.
- $\theta = 1$ si durée d'application est supérieur à 24 heures.
- $\theta = 0,9$ si la durée d'application est entre 1 heures et 24 heures.
- $\theta = 0,85$ si la durée d'application est inférieure à 1 heures.

NB :

γ_b : coefficient de sécurité.

θ : Coefficient qui est en fonction de la durée d'application des actions.

σ_{bc} : Contrainte de compression du béton.

0,85; Coefficient qui tient compte du fluage.

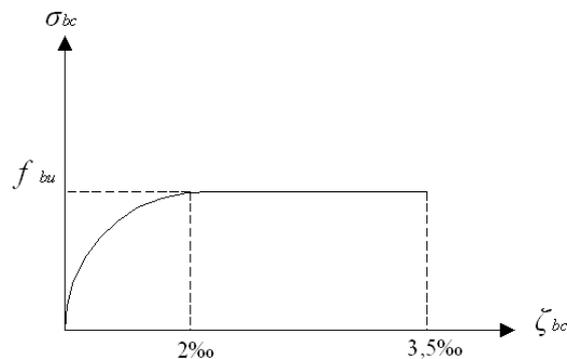


Figure II. 3: Diagramme Contraintes – Déformations ELU.

- **Etat limite de service « E.L.S » :**

C'est un état au-delà duquel l'ouvrage (ou un de ces éléments) ne vérifie plus: le confort et/ou la durabilité.

La contrainte limite de service est donnée par :

$$\sigma_{bc} = 0,6 f_{c28} = 15 \text{ MPA}$$

II.3. L'acier

- **Définition :**

L'acier est un alliage de fer et de carbone en faible pourcentage. Son rôle est d'absorber les efforts de traction, de cisaillement et de torsion. On distingue deux types d'aciers :

1. Aciers doux avec une teneur en carbone de 0.15 à 0.25%.
2. Aciers Haute adhérence avec une teneur en carbone de 0.25 à 0.40%.

• **Caractéristiques mécaniques :**

Les caractéristiques qui servent de base à la justification dans les cadres des états limites et la limite d'élasticité garantie <<fe>>.

Pour notre projet on prend des barres à haute adhérence(HA).

F_eE500, avec f_e =500MPa, ζ_{es}=1,74‰.

Les aciers sont aussi caractérisés par le module d'élasticité longitudinale. Les expériences ont montré que sa valeur est fixée quel que soit la nuance de l'acier à : E_s=2,1. 10⁵ MPa.

• **Contrainte limite de l'acier :**

a. **Etat Limite Ultime « E.L.U » :**

La contrainte limite des aciers est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} \text{ (MPa)}$$

Avec :

σ_s : Contrainte de l'acier

γ_s: Coefficient de sécurité de l'acier

γ_s = 1.15 cas d'actions courantes

γ_s = 1.00 cas d'actions accidentelles.

ε_s: Allongement relatif de l'acier,

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta L}{L}$$

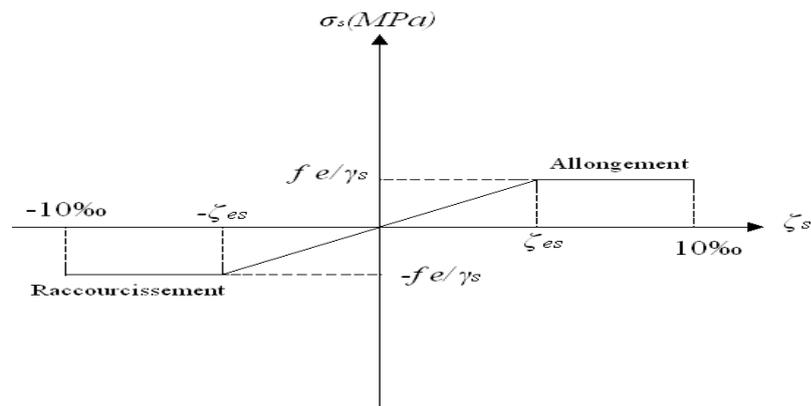


Figure II. 4: Diagramme Contraintes – Déformations de l'Acier.

b. Etat limite de service « E.L.S » :

Pour l'état limite d'ouverture des fissures, la contrainte des armatures est limitée à :

- Fissuration peu nuisible : pas de vérification
- Fissuration préjudiciable : $\sigma_s = \xi = \text{Min}\{2,3f_e; \text{Max}(0,5f_e; 110\sqrt{\eta f_{t28}})\}$
- Fissuration très préjudiciable : $\sigma_s = 0,8\xi$ MPa

η : Coefficient de fissuration tels que :

$\eta = 1$ pour des aciers ronds lisses

$\eta = 1,6$ pour des aciers de haute adhérence

- **Le coefficient d'équivalence :**

Le coefficient d'équivalence noté " η " est le rapport de $\frac{E_s}{E_b} = 15$.

E_s : Le module de déformation de l'acier.

E_b : Le module de déformation du béton.

- **Hypothèse de calcul :**

Le calcul en béton armé est basé sur les hypothèses suivantes:

- Les sections droites restent planes après déformation.
- Il n'y a pas de glissement entre les armatures d'acier et le béton.
- Le béton tendu est négligé dans le calcul de la résistance à cause de sa faible résistance à la traction.
- Le raccourcissement unitaire du béton est limité à 3,5 ‰ en flexion simple ou composée et à 2‰ dans la compression simple.
- L'allongement unitaire dans les aciers est limité à 10‰.
- La contrainte de calcul, notée " σ_s " et qui est définie par la relation $\frac{f_e}{\sigma_s}$ est égale à :

$$\sigma_s = 348 \text{ MPa} \quad \text{situation durable}$$

$$\text{Haute adhérence } \{ \sigma_s = 400 \text{ MPa} \quad \text{situation accidentelle}$$

Allongement de rupture : $\xi_s = 10\%$.

Partie3 : « Pré-dimensionnement »

II.1. Introduction

Le pré dimensionnement des éléments résistants est une étape régie par des lois empiriques issues de l'expérience, il sera fait selon le CBA et vérifié par le RPA99/version 2003. Cette étape représente le point de départ et la base de la justification à la résistance, la stabilité et la durabilité de l'ouvrage. Pour ce faire, nous commençons le pré dimensionnement du sommet vers la base :

- Les planchers,
- Les poutres,
- Les poteaux,
- Les voiles.

II.2. Pré-dimensionnement des éléments secondaires

Un plancher est une aire plane horizontale qui sert à séparer les étages, sa fonction principale est de résister et supporter les charges et surcharges afin de les transmettre aux éléments porteurs (poutres, poteaux et voiles), ainsi que de remplir la condition d'isolation acoustique et la sécurité d'incendie.

A. Plancher à corps creux :

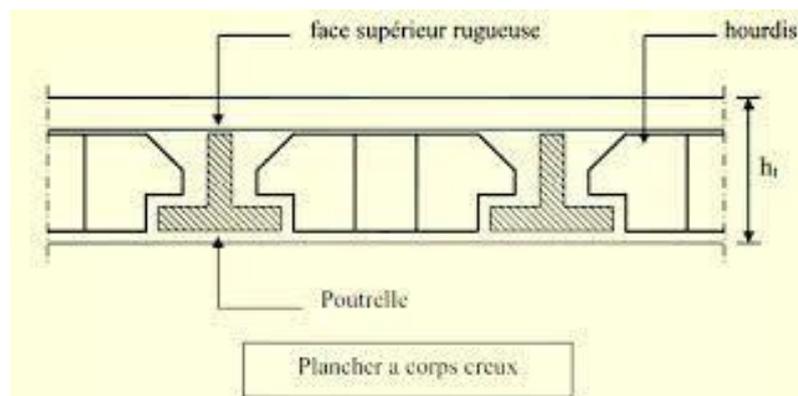


Figure II. 5: Dalle à corps creux.

Les planchers à corps creux sont constitués de :

- poutrelles préfabriquées
- entrevous (éléments à corps creux)
- dalle de compression (hourdis)

Selon le CBA93, on doit dimensionner le plancher selon la condition suivante :

$$\frac{L}{25} \leq h \leq \frac{L}{20}$$

$$h_t \geq \frac{L}{22.5}$$

Avec :

h_t : Épaisseur de la dalle de compression corps creux,

L : portée maximale entre nus d'appuis dans le sens des poutrelles,

$$L=5.89-0.35=5.54\text{m}$$

$$h_t=24.62\text{cm}$$

On prend :

$$h_t=25\text{cm}$$

$$h_t= (20+5) \text{ cm}$$

Avec :

20cm : épaisseur du corps creux.

5cm : épaisseur de la dalle de compression.

B. Plancher dalle pleine :

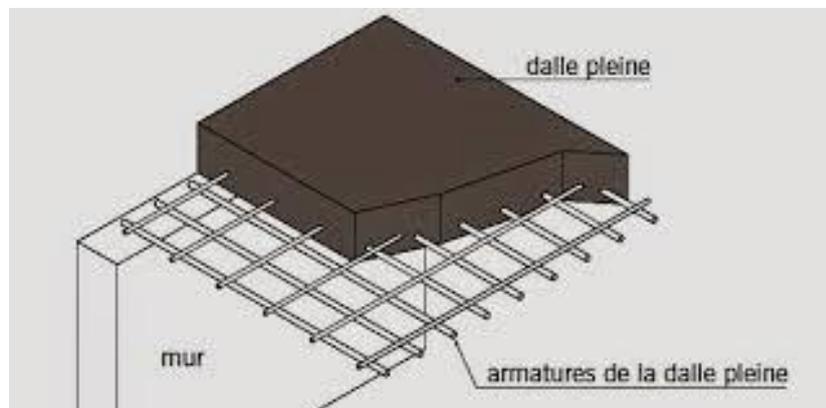


Figure II. 6: Dalle pleine.

- Isolation phonique:

Selon les règles techniques « CBA93 » en vigueur en Algérie l'épaisseur du plancher doit être supérieure ou égale à 15 cm pour obtenir une bonne isolation acoustique.

- Résistance au feu :

$e = 7$ cm pour une heure de coupe-feu.

$e = 11$ cm pour deux heures de coupe-feu.

$e = 17.5$ cm pour quatre heures de coupe-feu.

- Résistance à la flexion :

Les conditions qui doivent être vérifiées selon le nombre des appuis sont les suivantes :

$$h \geq \frac{L_X}{20} \text{ Pour les dalles sur appuis simple avec } a = \frac{L_X}{L_Y} > 0.4$$

$$\frac{L_X}{35} \leq h \leq \frac{L_X}{30} \text{ Pour les dalles continues avec } a = \frac{L_X}{L_Y} \leq 0.4$$

$$\frac{L_X}{45} \leq h \leq \frac{L_X}{40} \text{ Pour les dalles continues avec } 0.4 \leq a = \frac{L_X}{L_Y} \leq 1$$

Avec :

h : l'épaisseur de la dalle

L_X : La petite portée de la dalle

L_Y : La grande portée de la dalle

$$L_X = 2.85 \text{ m}$$

$$L_Y = 8.21 \text{ m}$$

$$8.14 \leq h \leq 9.5$$

On prend :

$$h = 15 \text{ cm}$$

Conclusion:

Pour le pré dimensionnement des planchers nous adopterons :

Pour les planchers à corps creux : $h_t = 25 \text{ cm}$.

Et pour les dalles pleines des balcons : $h = 15 \text{ cm}$

II.3. Evaluation des Charge et surcharge**1. Charges permanentes G :****➤ Corps creux:****1/Plancher Terrasse :**

Tableau II. 1: Evaluation des charges du plancher corps creux terrasse.

Gravillon de protection (e = 5 cm ; $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$)	0.90kN/m ²
Etanchéité multicouches (e = 2 cm ; $\rho = 6 \text{ kN/ m}^3$)	0.12kN/m ²
Forme de pente (emoy = 10 cm ; $\rho = 22 \text{ N/ m}^3$)	2.20kN/m ²
Isolation thermique (e = 4 cm ; $\rho = 4 \text{ kN/ m}^3$)	0.16kN/m ²
Dalle corps creux (ep = 20+5 cm ; $\rho = 25 \text{ kN/ m}^3$)	2.2kN/m ²
Enduit en plâtre (e = 2 cm ; $\rho = 10 \text{ kN/ m}^3$)	0.20kN/m ²
Somme	5.78kN/m²

2/Etage Courant :**Tableau II. 2:** Evaluation des charges du plancher corps creux courant.

Carrelage (e = 2 cm ; $\rho = 20 \text{ kN/m}^3$)	0.40kN/ m ²
Mortier de pose (e = 2 cm ; $\rho = 20 \text{ kN/m}^3$)	0.40kN/ m ²
Lit de sable (e = 3 cm ; $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$)	0.54kN/ m ²
Plancher corps creux (ep = 20+5)	2.2kN/m ²
Enduit en plâtre (e = 2 cm ; $\rho = 10 \text{ kN/m}^3$)	0.20kN/ m ²
Cloisons légères	1.00kN/ m ²
Somme	4.74kN/m²

Dalle pleine :**Tableau II. 3:** Evaluation des charges de la dalle pleine.

Carrelage (e = 2 cm ; $\rho = 20 \text{ kN/m}^3$)	0.40 kN/m ²
Mortier de pose (e = 2 cm ; $\rho = 20 \text{ kN/m}^3$)	0.40 kN/ m ²
Lit de sable (e = 2 cm ; $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$)	0.36 kN/ m ²
Dalle pleine (ep = 15 cm; $\rho = 25 \text{ kN/m}^3$)	Calculé automatiquement par le logiciel
Enduit en plâtre (e = 2 cm ; $\rho = 12 \text{ kN/m}^3$)	0.24kN/ m ²
Cloisons légères	1.00 kN/ m ²
Somme	2.4 kN/m²

➤ Maçonnerie :**Tableau II. 4:** Evaluation de charge de la maçonnerie.

Enduit intérieur au plâtre (e = 2cm ; $\rho = 10\text{kN/m}^3$)	0.20kN/ m ²
Brique creuse (e = 10 cm ; $\rho = 9\text{kN/m}^3$)	0.90kN/ m ²
Lame d'air (e = 5cm)	0.00kN/ m ²
Brique creuse (e = 15 cm ; $\rho = 9\text{kN/m}^3$)	1.35kN/ m ²
Enduit extérieur au plâtre (e = 2 cm ; $\rho = 18\text{kN/m}^3$)	0.36kN/ m ²
Somme	2.81kN/m²

➤ **Acrotère :**

Le poids propre de l'acrotère pour 1 ml est de $G1 = S \times \gamma_b$

Avec :

γ_b : Le poids volumique du béton tel que $\gamma_b = 25 \text{ kN/m}^3$

S : La surface transversale totale.

$$S = (0.1 \times 0.75) + (0.08 \times 0.1) + (0.1 \times \frac{0.02}{2}) = 0.084 \text{ m}^2$$

D'où le poids propre de l'acrotère :

$$G1 = 25 \times 0.084 = 2.1 \text{ kN/ml}$$

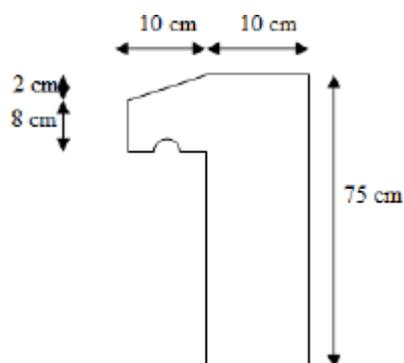


Figure II. 7: dimensions de l'acrotère.

1. Charges d'exploitation Q :

Vu la nature des planchers et leur usage, on distingue les charges d'exploitations suivantes :

Tableau II. 5: Evaluation des Charges d'exploitation.

Plancher terrasse à Corps creux (accessible)	1.5 kN/m ²
Plancher usage d'habitation à Corps creux	1.5kN/ml
Plancher à dalle pleine (balcon)	3.5 kN/m ²
Acrotère (main courante)	1.0 kN/m ²

II.4. Pré-dimensionnement des éléments résistants

II.4.1. Pré dimensionnement des poutres

Les poutres sont des éléments porteurs horizontaux en béton armé, leur pré dimensionnement s'effectue par des formules données par les BAEL91 (modifié 99), les

sections trouvées doivent vérifier les conditions imposées par le règlement parasismique Algérien (RPA99) ; Les deux étapes précédentes sont résumées dans ce qui suit :

Selon le BAEL 91 modifié 99 :

La hauteur h de la poutre doit être: $\frac{L_{max}}{15} \leq h \leq \frac{L_{max}}{10}$

La largeur b de la poutre doit être: $0.3h \leq b \leq 0.6h$

Avec:

L_{max} : Portée maximale de la poutre

b : Largeur de la poutre

h : Hauteur de la poutre

Selon le RPA 99 (version 2003) :

La hauteur h de la poutre doit être : $h \geq 30\text{cm}$

La largeur b de la poutre doit être : $b \geq 20\text{cm}$

Le rapport hauteur largeur doit être : $\frac{h}{b} \leq 4$

Poutre principale :

$L_{max} = 8.21 - 0,35 = 7.86 \text{ m}$

$\frac{7,86}{15} \leq h \leq \frac{7,86}{10} \rightarrow 0.52 \leq h \leq 0.78 \rightarrow h=65\text{cm}$

$0.3(65) \leq b \leq 0.6(65) \rightarrow 19.5 \leq b \leq 39 \rightarrow b=40\text{cm}$

Nous choisissons une poutre de $b \times h = 40 \times 65 \text{ cm}^2$

Vérification selon le RPA99 :

$h=65 \geq 30\text{cm}$

$b=40 \geq 20\text{cm}$

$\frac{h}{b} = \frac{65}{40} = 1.625 \leq 4$

Les trois conditions dictées par le RPA99 sont vérifiées.

a) Poutre secondaire (sens non porteur) :

$$L_{\max} = 5.89 - 0.35 = 5.54 \text{ m}$$

$$\frac{5.54}{15} \leq h \leq \frac{5.54}{10} \rightarrow 0.37 \leq h \leq 0.55 \rightarrow h = 45 \text{ cm}$$

$$0.3(45) \leq b \leq 0.6(45) \rightarrow 13.5 \leq b \leq 27 \rightarrow b = 30 \text{ cm}$$

Nous choisissons une poutre de $b \times h = 30 \times 45 \text{ cm}^2$

Vérification selon le RPA99 :

$$h = 45 \geq 30 \text{ cm}$$

$$b = 30 \geq 20 \text{ cm}$$

$$\frac{h}{b} = \frac{45}{30} = 1.5 \leq 4$$

Les trois conditions dictées par le RPA99 sont vérifiées.

Tableau II. 6: Dimensions finales des poutres.

Poutre	Section
Poutre porteuse	40x65
poutre non porteuse	30x45

II.4.2. Pré dimensionnement des voiles

L'épaisseur minimale est de 15 cm, l'épaisseur est déterminée en fonction de la hauteur libre d'étage h_e ,

D'après le RPA99 version 2003, les voiles doivent satisfaire la condition :

$$l > 4a$$

a : l'épaisseur du voile

l : longueurs de voile

$$a \geq \frac{h_e}{25}$$

$$h_e = 3.2 - 0.35 = 2.85 \text{ m}$$

$$a \geq \frac{2.85}{25} = 11.4 \text{ cm}$$

On prend :

$$a=20\text{cm.}$$

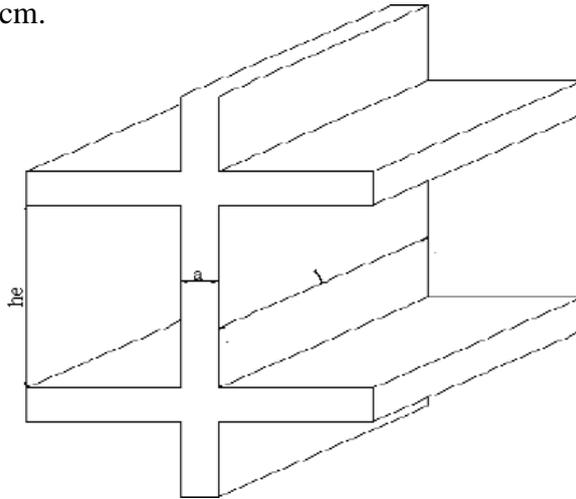


Figure II. 8: Coupe d'un voile en élévation

II.4 3. Pré-dimensionnement des poteaux

Les poteaux sont près dimensionnés en compression simple en choisissant type de poteaux le plus sollicité de la structure,

➤ **Etapes de pré-dimensionnement :**

- Calcul de la surface reprise par chaque poteau.
- Évaluation de l'effort normal ultime de la compression à chaque niveau.
- Les poteaux sont calculés aux états limites ultimes (ELU) en compression simple.
- Vérification des sections à l'ELS selon le « BAEL 91 modifié 99 ».

- selon le « BAEL 91 modifié 99 » :

$$0.2\% \leq \frac{A_s}{B} \leq 5\%$$

On cherche à déterminer le poteau de telle sorte que :

$$\frac{A_s}{B} = 1\%$$

➤ **Dimensionnement des poteaux :**

Le pré-dimensionnement est déterminé en supposant que les poteaux sont soumis à la compression selon la formule suivante :

$$N_u \geq \alpha \left[\frac{B_r f_{c28}}{0,9\gamma_b} + \frac{A_s f_e}{\gamma_s} \right]$$

Avec :

N_u : Effort normale maximale à l'ELU calculé en utilisant la règle de dégression verticale.

$$N_u = 1.35 G + 1.5 Q$$

B_r : section réduite du Poteau calculée à partir des dimensions réelles du poteau réduite de 2cm.

Avec:

$$B_r = (a - 2 \text{ cm}) \times (b - 2 \text{ cm})$$

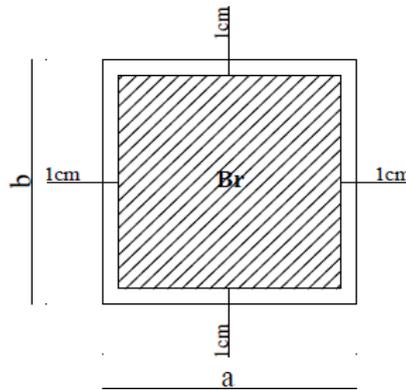


Figure II. 9: Section réduite du poteau

Avec:

A_s : Section d'armatures dans le poteau égale à 0.1% de la section réelle du poteau.

f_{c28} : Contrainte de compression du béton à 28jours , $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$

f_e : Contrainte limite élastique des aciers, $f_e = 500 \text{ MPa}$

γ_b : Coefficient de sécurité du béton, tel que :

$$\begin{cases} \gamma_b = 1.15 \text{ situation accidentelle} \\ \gamma_b = 1.5 \text{ situation durable ou transitoire.} \end{cases}$$

γ_s : Coefficient de sécurité de l'acier, tel que :

$$\begin{cases} \gamma_s = 1.15 \text{ situation durable ou transitoire} \\ \gamma_s = 1 \text{ situation accidentelle.} \end{cases}$$

α : Coefficient de réduction destiné à tenir compte à la fois des efforts du second ordre et de l'excentricité additionnelle.

$$\alpha = f(\lambda) = \frac{0.85}{1 + 0.2 \left(\frac{\lambda}{35}\right)^2} \quad \text{pour: } \lambda \leq 50$$

$$\alpha = 0.6 \left(\frac{\lambda}{50}\right)^2 \quad \text{pour: } 50 \leq \lambda \leq 70$$

$$\alpha = \frac{0.85}{\beta} \begin{cases} \beta = 1.200 & \text{pour: } \lambda = 35 \\ \beta = 1.0408 & \text{pour: } \lambda = 50 \\ \beta = \frac{0.85 h^2}{1500} & \text{pour: } 50 \leq \lambda \leq 70 \end{cases}$$

λ : L'élanement d'EULER ; $\lambda = \frac{l_f}{i}$

l_f : La longueur de flambement

i : Rayon de giration ; $= \frac{I}{B}$

I : Moment d'inertie de la section par rapport à l'axe passant par son centre de gravité et perpendiculaire au plan de flambement ; $I = \frac{b \cdot h^3}{12}$

Alors :

On prend dans notre cas : $\beta = 1,200$; $\text{pour: } \lambda = 35$

$$B_r \geq \frac{N_U}{\alpha \left[\frac{f_{c28}}{0.9\gamma_b} + \frac{A_s f_e}{B\gamma_s} \right]}$$

Alors : $B_r > 0.0617N_U$

Selon le RPA 99 modifié 2003 pour une zone sismique II

$$\begin{aligned} \min(a, b) &\geq 25\text{cm} \\ \min(a, b) &\geq \frac{h_e}{20} \\ \frac{1}{4} &< \frac{a}{b} < 4 \end{aligned}$$

a et b : Dimensions de la section

h_e : Hauteur de l'étage

- **Vérification à l'ELS :**

$$\sigma_s = \frac{N_{ser}}{B + nA_s} \leq 0.6 f_{c28}$$

n : Coefficient d'équivalence, $n = \frac{E_s}{E_b}$

σ_s : Contrainte de compression à l'ELS

N_{ser} : Effort normale à l'ELS

B : Section de béton du poteau

A_s : Section d'armatures d'acier

On obtient : $\frac{N_{ser}}{1.15B} \leq 0.6f_{c28}$

D'où : $B \geq \frac{N_{ser}}{0.69f_{c28}} \rightarrow B \geq 0.579N_{ser} (cm^2)$

Poteau central:

$$S = (3.93 + 3.825) * (2.565 + 2.77) = 41.37m^2$$

➤ **Calcul des différents poids**

1- Poids des planchers

Plancher terrasse → $5.78 * 41.37 = 239.119kN$

Plancher étage courant (corps creux) → $4.74 * 41.37 = 196.094kN$

2- Poids des poutres :

$P_p = 25 * 0.65 * 0.4 * 7.755 = 50.408kN$

$P_s = 25 * 0.45 * 0.3 * 5.335 = 18.006kN$

3- Poids des poteaux

Poteau du RDC:

$$25 * 0.35 * 0.35 * 5 = 15.313kN$$

Poteau du 1^{er} à 6^{ème}:

$$25 * 0.35 * 0.35 * 3.2 = 9.80kN$$

➤ **Dégression des surcharges**

$$S_{ter} = (3.93 + 3.825 + 0.35) * (2.565 + 2.77 + 0.35) = 46.08m^2$$

Tableau II. 7: Dégression des surcharges d'exploitation.

Niveau	Qi	charges exploitations	Q total
N1	Q0	$\sum 0 = Q0$	1.5
N2	Q1	$\sum 1 = Q0 + Q1$	3
N3	Q2	$\sum 2 = Q0 + 0,95(Q1 + Q2)$	4.35
N4	Q3	$\sum 3 = Q0 + 0,9(Q1 + Q2 + Q3)$	5.55
N5	Q4	$\sum 4 = Q0 + 0,85(Q1 + Q2 + Q3 + Q4)$	6.6
N6	Q5	$\sum 5 = Q0 + 0,8(Q1 + Q2 + Q3 + Q4 + Q5)$	7.5
N7	Q6	$\sum 6 = Q0 + 0,75(Q1 + \dots + Q6)$	8.25
N8	Q7	$\sum 7 = Q0 + 0,714(Q1 + \dots + Q7)$	9

1. Descente de charge:

Tableau II. 8: Descente de charge du poteau central.

Étages	Niveau	Désignation des éléments	G (kN)	Q (kN)
7 ^{ème}	N1	Poids du plancher terrasse	239.119	69.12
		Poids des poutres	68.414	
		Total	307.533	
6 ^{ème}	N2	Venant de N1	307.533	138.24
		Poids du plancher courant	196.094	
		Poids des poutres	68.414	
		Poids du Poteau	9.80	
		Total	855.946	
5 ^{ème}	N3	Venant de N2	855.946	200.448
		Poids du plancher courant	196.094	
		Poids des poutres	68.414	
		Poids du Poteau	9.80	
		Total	1130.254	
4 ^{ème}	N4	Venant de N3	1130.254	255.744
		Poids du plancher courant	196.094	
		Poids des poutres	68.414	
		Poids du Poteau	9.80	
		Total	1404.562	
3 ^{ème}	N5	Venant de N4	1404.562	304.128
		Poids du plancher courant	196.094	
		Poids des poutres	68.414	
		Poids du Poteau	9.80	
		Total	1678.87	
2 ^{ème}	N6	Venant de N5	1678.87	345.6
		Poids du plancher courant	196.094	
		Poids des poutres	68.414	
		Poids du Poteau	9.80	
		Total	1953.178	

1er	N7	Venant de N6	1953.178	380.16
		Poids du plancher courant	196.094	
		Poids des poutres	68.414	
		Poids du Poteau	9.80	
		Total	2227.486	
RDC	N8	Venant de N7	2227.486	414.72
		Poids du plancher courant	196.094	
		Poids des poutres	68.414	
		Poids du Poteau	15.313	
		Total	2507.307	

2. Choix des sections des poteaux :

Tableau II. 9: Choix de sections des poteaux centraux.

Etages	NG (kN)	NQ (kN)	Nu (kN)	Br (cm ²)	a=b(cm) calculée	Min RPA	Choix (cm ²)	B (cm ²)	$0.579N_{ser}$ (cm ²)	Obs
Terrasse	307.533	69.12	518.849	320.130	17.89	25x25	35x35	1225	218.08	OK
6ème	855.946	138.24	1362.887	840.901	29.00	25x25	35x35	1225	575.63	OK
5ème	1130.254	200.448	1826.515	1126.960	33.57	25x25	35x35	1225	770.48	OK
4ème	1404.562	255.744	2279.775	1406.621	37.50	25x25	45x45	2025	961.32	OK
3ème	1678.87	304.128	2722.667	1679.886	40.99	25x25	45x45	2025	1148.16	OK
2ème	1953.178	345.60	3155.190	1946.750	44.12	25x25	50x50	2500	1330.99	OK
1er	2227.486	380.16	3577.346	2207.222	46.98	25x25	55x55	3025	1509.83	OK
RDC	2507.307	414.72	4006.944	2472.284	49.72	25x25	55x55	3025	1691.85	OK

3. Récapitulatif des dimensions des poteaux :

Les sections calculées pour le type de poteaux le plus sollicité, néanmoins nous allons adoptés des sections identiques et ceux pour faciliter et simplifier la modélisation ainsi que les calculs du ferrailage.

Tableau II. 10: Récapitulatif des dimensions des poteaux.

Niveau	Poteau central
Terrasse	35x35
6ème	35x35
5ème	35x35
4ème	45x45
3ème	45x45
2ème	50x50
1ème	55x55
RDC	55x55

Partie 4 : « Etude dynamique »

II.1. Introduction

Le séisme est l'un des risques naturels majeurs les plus dangereux et qui causent le plus de dégâts, l'analyse sismique doit être rigoureuse afin d'assurer la sécurité et la longévité de la structure et d'éviter sa ruine en cas de séisme.

II.2. Modélisation de la structure

Afin de faciliter l'analyse dynamique un modèle numérique représentant la structure est créé est ensuite introduit dans un programme de calcul qui permet de déterminer les modes propres de vibrations ainsi que les efforts engendrés par le séisme ainsi que par les charges statiques.

II.3. Modélisation de la rigidité

II.3.1. Les éléments de portiques

Chaque poutre et poteau est modélisé par un élément linéaire type barre (frameelements) à deux nœuds, chaque nœud possède 6 degrés de liberté (trois translations et trois rotations).

Les poutres se situent entre deux nœuds d'un même niveau (niveau i).

Les poteaux se situent entre deux nœuds de deux niveaux adjacents (niveau i et niveau i+1).

II.3.2. Les voiles

Les voiles ont été modélisés par des éléments plaque (shell elements) à 04 quatre nœuds.

II.3.3. Les planchers

Les planchers sont considérés infiniment rigides dans leurs plans et ne peuvent se déformer qu'hors plans, ils sont donc modélisés par des diaphragmes.

II.3.4. Connectivité sol/structure

Tous les nœuds de la base du bâtiment sont encastrés (6DDL bloqués)

II.4. Modélisation de la masse

- La masse est calculée par l'équation $G + \beta Q$.

- La masse volumique attribuée aux matériaux constituant les poteaux, poutres, dalles est prise égale à celle du béton armé.
-La masse des planchers a été répartie sur les poutres porteuses en termes de charge.
- La masse de l'acrotère et des murs extérieurs (maçonnerie) a été répartie au niveau des poutres du périmètre des planchers (uniquement le plancher terrasse pour l'acrotère).
- Sur **SAP2000** l'option (mass source/from loads) et à partir des charges permanentes et d'exploitation sollicitant la structure, permet le calcul des masses des planchers et la masse totale de la structure.

II.5. Choix de la méthode de calcul

Selon les règles parasismiques algériennes (**RPA99/version2003**) le calcul des forces sismiques peut être mené suivant trois méthodes :

- La méthode statique équivalente.
- La méthode d'analyse modale spectrale.
- La méthode de la superposition modale.

Vu que la méthode d'analyse modale spectrale peut être appliquée dans tous les cas, nous utiliserons cette dernière pour l'analyse sismique.

II.6. Méthode modale spectrale

II.6.1. Principe de la méthode

Par cette méthode il est recherché pour chaque mode de vibration, le maximum des effets engendrés dans la structure par les forces sismiques représentées par un spectre de réponse de calcul. Ces effets sont par la suite combinés pour obtenir la réponse de la structure.

II.6.2. Hypothèse

Les structures irrégulières en plan, sujettes à la torsion et comportant des planchers rigides sont représentées par un modèle tridimensionnel encastré à la base et où les masses sont concentrées au niveau des centres de gravité des planchers avec trois DDL (2 translations horizontales et une rotation d'axe vertical).

Le nombre de mode à prendre en compte est tel que la somme des coefficients massique de ces modes soit aux moins égales à 90%

Le minimum des modes à retenir est de trois dans chaque direction considérée.

II.6.3. Spectre de réponse de calcul

L'action sismique est représentée par le spectre de calcul suivant :

$$s_a = \begin{cases} 1.25A (1 + \frac{1}{R} (2.5\eta^Q - 1)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A)^{\frac{Q}{R}} & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A)^{\frac{Q}{R}} (\frac{T_2}{T})^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 2.5\eta(1.25A)^{\frac{Q}{R}} (\frac{T_2}{3})^{\frac{2}{3}} (\frac{3}{T})^{\frac{5}{3}} & T > 3s \end{cases}$$

Avec :

T : période fondamentale de la structure.

A : coefficient d'accélération de zone.

η : Facteur de correction d'amortissement.

R : coefficient de comportement de la structure.

T₁ et T₂ : période caractéristique associées à la catégorie du site.

Q : facteur de qualité.

II.6.4. Résultante des forces sismiques de calcul

Le RPA99/version2003 préconise la vérification de la condition suivante :

$$VT \geq 0.8V$$

Avec :

VT : la résultante des forces sismiques à la base obtenue par combinaison des valeurs modales.

V : la résultante des forces sismiques déterminée par la méthode statique équivalente.

II.6.5. Calcul de la force sismique par la méthode statique équivalente

La formule de la force sismique selon l'article 4.2.3. De l'RPA 99 modifié 2003 est la suivant :

$$V = \frac{A \cdot D \cdot Q}{R} W$$

A : Coefficient d'accélération de zone, A=0,15 (zone II groupe d'usage 2).

R : coefficient de comportement de la structure. Nous avons choisi de travailler avec R=4, cette valeur choisit sera justifier.

W : poids total de la structure calculé par le logiciel SAP2000 selon la combinaison G+βQ avec β=0.3 (Hôtel).

D : facteur d'amplification dynamique moyen fonction de la catégorie du site, du facteur de correction d'amortissement (η) et de la période fondamentale de la structure (T).

$$D = \begin{cases} 2.5\eta & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta \left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 2.5\eta \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} & T > 3 \end{cases}$$

$$T_1 = 0.15s$$

Pour cette étude la Catégorie du site est S_3 { $T_2 = 0.50s$

II.6.6. Estimation de la période fondamentale de la structure T

La valeur de la période fondamentale T de la structure peut être calculée à partir de formules empirique ou calculée par les méthodes analytiques ou numériques. Calcul de la période par la formule empirique :

$$T = \min(C_T h_N^{3/4}; 0.09 \frac{h_N}{\sqrt{L}})$$

C_T : Coefficient fonction du système de contreventement et du type de remplissage soit

$$C_T = 0,05$$

h_N : Hauteur mesurée en mètres à partir de la base de la structure jusqu'au dernier niveau.

$$h_N = 28,20m$$

L : dimension du bâtiment mesurée à sa base dans la direction de calcul considérée.

$$L_X = 56.40m$$

$$L_Y = 15.55m$$

η : Facteur de correction d'amortissement, il est fonction du pourcentage d'amortissement critique ξ , ou $\xi = 7\%$

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}} = 0.88 \geq 0.7$$

$$T = C_T h_N^{3/4} = 0.05 * 28,20^{3/4} = 0.612s ; \text{ pour les deux directions.}$$

$$T_X = 0.09 \frac{h_N}{\sqrt{L_X}} = 0.09 \frac{28.2}{\sqrt{56.4}} = 0.338s$$

$$T_Y = 0.09 \frac{h_N}{\sqrt{L_Y}} = 0.09 \frac{28.2}{\sqrt{15.55}} = 0.644s$$

$$\text{Sens X-X : } T_X = \min(0.612 ; 0.338) = 0.338s$$

$$\text{Sens y-y : } T_y = \min(0.612 ; 0.644) = 0.612s$$

II.6.7. Facteur de qualité Q

La valeur de Q est déterminée par la formule :

$$Q = 1 + \sum P_q$$

Tableau II. 11: Calcul du facteur de qualité.

Critère q	Selon x-x		Selon y-y	
	Observé	Pénalité	Observé	pénalité
1-conditions minimale sur lesfiles de contreventement	oui	0	oui	0
2- redondance en plan	oui	0	oui	0
3- régularité en plan	non	0.05	non	0.05
4- régularité en élévation	oui	0	oui	0
5-contrôle de la qualité desmatériaux	oui	0	oui	0
6- contrôle de la qualité del'exécution	oui	0	oui	0
Total	0.05		0.05	

$$Q = Q_x = Q_y = 1 + 0.05 = 1.05$$

$$V_x = \frac{A \cdot D_x \cdot Q}{R} W$$

$$V_y = \frac{A \cdot D_y \cdot Q}{R} W$$

II.7. Résultats de l'analyse sismique

Nous présentons dans ce qui suit le modèle final pour lequel toutes les vérifications et les justifications ont été faites.

Il est clair que plusieurs modèles, correspondant à différentes dispositions des voiles de contreventement ont été analysés.

Rappelons que les voiles de contreventement ont été disposés.

- dans les deux directions (x et y).
- le plus éloigné possible du centre de rigidité.
- dans la mesure du possible de manière symétrique.

L'analyse dynamique de la structure a conduit à :

- Une période du 1^{er} mode : T = 0.608sec.
- La participation massique dépasse le seuil des 90% à partir du mode 33.
- Le 1^{er} mode est un mode de translation parallèle à la direction y-y.
- Le 2^{ème} mode est un mode de translation parallèle à la direction x-x.

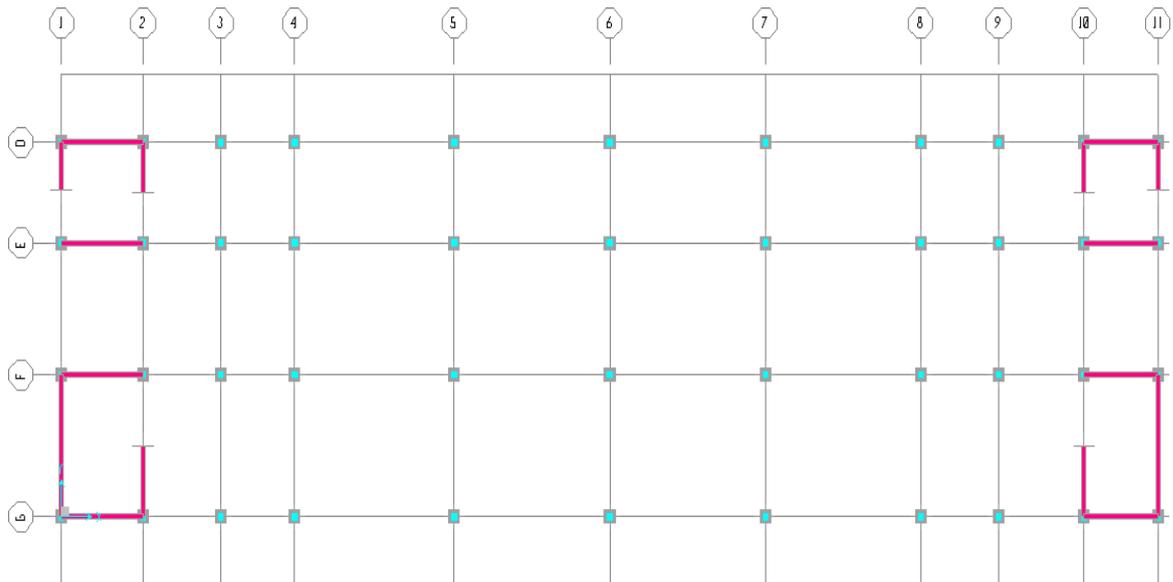


Figure II. 10: Disposition des voiles dans le modèle final.

Tableau II. 12: Périodes et Taux de Participation Massique.

Mode	Période	Ux	Uy	SumUx	SumUy
1	0.608134	0.00001482	0.71511	0.00001482	0.71511
2	0.553438	0.69886	0.00001718	0.69888	0.71513
3	0.390043	0.00092	0.0001	0.6998	0.71523
4	0.185729	0.00000172	0.14882	0.6998	0.86405
5	0.164017	0.000000113	0.00252	0.6998	0.86657
6	0.159517	2.366E-07	0.00294	0.6998	0.86952
7	0.156032	5.735E-08	0.00053	0.6998	0.87005
8	0.151069	5.085E-08	0.00045	0.6998	0.8705
9	0.145698	0.00138	3.584E-07	0.70118	0.8705
10	0.143696	0.20212	0.000001697	0.9033	0.8705
11	0.141008	6.921E-08	0.0004	0.9033	0.8709
12	0.140042	0.00000622	0.000002114	0.90331	0.87091
13	0.138471	8.295E-09	0.00034	0.90331	0.87125
14	0.132866	2.135E-09	0.00061	0.90331	0.87186
15	0.131236	3.798E-08	0.00068	0.90331	0.87254
16	0.13066	1.221E-08	0.00018	0.90331	0.87272
17	0.128552	4.613E-11	0.00004659	0.90331	0.87277
18	0.12828	0.000001004	0.000007279	0.90331	0.87277

19	0.128195	5.287E-09	0.0003	0.90331	0.87307
20	0.127253	1.067E-09	0.00026	0.90331	0.87334
21	0.126778	1.881E-08	0.000000552	0.90331	0.87334
22	0.125112	0.000001237	1.611E-07	0.90331	0.87334
23	0.123319	5.993E-12	0.00039	0.90331	0.87373
24	0.122676	8.897E-10	0.0002	0.90331	0.87393
25	0.121896	1.479E-07	0.00011	0.90331	0.87404
26	0.120048	1.315E-07	0.00208	0.90331	0.87612
27	0.119309	2.803E-08	0.00006149	0.90331	0.87618
28	0.119162	0.000001075	3.553E-07	0.90331	0.87618
29	0.118737	1.473E-08	0.000002113	0.90331	0.87618
30	0.117525	0.000001885	0.00004891	0.90331	0.87623
31	0.117246	2.315E-07	0.00015	0.90331	0.87638
32	0.114281	0.00027	0.00203	0.90358	0.87841
33	0.113834	0.00001254	0.04594	0.90359	0.92434

II.7.1. Résultantes des forces sismiques

Selon l'article 4.2.4 (4) R.P.A99/v2003, la période doit être majorée de 30%

$$T_x=0.439s$$

$$T_y=0.795s$$

Car d'après le fichier sorti du SAP 2000 on a $W= 114297.085kN$

$$D_x=2.20$$

$$D_y=1.74$$

$$V_{Xsta}=9922.555kN \rightarrow 0.8 \times V_{Xst}=7938.044kN \leq V_{Xdyn}=8060.97kN \text{ vérifiée.}$$

$$V_{Ysta}=7816.667kN \rightarrow 0.8 \times V_{Yst}=6253.333kN \leq V_{Ydyn}=7507.06kN \text{ vérifiée.}$$

II.7.2. Vérification des déplacements inter étage

Tableau II. 13: Vérification des déplacements inter étages x-x.

	$\delta_{ek} (Cm)$	$\delta_k (Cm)$	δ_{k-1} (cm)	Δ_k (cm)	h_k (cm)	Δ_k / h_k (%)	
7ème	1.574769	6.30	5.16	1.14	400.00	0.28%	Vérifiée
6ème	1.290016	5.16	4.23	0.93	320.00	0.29%	Vérifiée
5ème	1.058737	4.23	3.32	0.92	320.00	0.29%	Vérifiée
4ème	0.82933	3.32	2.46	0.86	320.00	0.27%	Vérifiée
3ème	0.614067	2.46	1.66	0.79	320.00	0.25%	Vérifiée
2ème	0.415821	1.66	0.99	0.68	320.00	0.21%	Vérifiée
1er	0.246522	0.99	0.46	0.53	320.00	0.17%	Vérifiée
RDC	0.114191	0.46	0.00	0.46	500.00	0.09%	Vérifiée

Tableau II. 14: Vérification des déplacements inter étages y-y.

	$\delta_{ek} (Cm)$	$\delta_k (Cm)$	δ_{k-1} (cm)	Δ_k (cm)	h_k (cm)	Δ_k / h_k (%)	
7ème	1.743487	6.97	5.80	1.17	400.00	0.29%	Vérifiée
6ème	1.451234	5.80	4.85	0.95	320.00	0.30%	Vérifiée
5ème	1.212988	4.85	3.89	0.97	320.00	0.30%	Vérifiée
4ème	0.971615	3.89	2.95	0.94	320.00	0.29%	Vérifiée
3ème	0.736782	2.95	2.05	0.89	320.00	0.28%	Vérifiée
2ème	0.513333	2.05	1.26	0.80	320.00	0.25%	Vérifiée
1er	0.31379	1.26	0.60	0.66	320.00	0.21%	Vérifiée
RDC	0.148875	0.60	0.00	0.60	500.00	0.12%	Vérifiée

Les déplacements relatifs inter étages sont inférieurs à la limite imposée par le « RPA99version 2003 ».

II.7.3. Vérification spécifique sous sollicitations normales

Dans le but d'éviter ou de limiter le risque de rupture fragile sous sollicitations d'ensemble dues au séisme, le RPA 99 / Version 2003 (Art 7.4.3.1) exige de vérifier l'effort normal de compression de calcul qui est limité par la condition suivante :

$$v = \frac{N_d}{Bc \cdot f_{c28}} < 0.3$$

Avec :

v : L'effort normal réduit.

Bc : Section du poteau.

N_d : L'effort normal de calcul s'exerçant sur une section de béton sous sollicitationsismique (G+Q+E).

f_{c28} : La résistance à la compression du béton à 28 jours.

Tableau II. 15: Vérification de l'effort normal réduit (poteaux carrés).

Niveaux	N_d (KN)	Bc (cm ²)	v	Obs
RDC	1551.602	3025	0.205	vérifiée
1er	1551.602	3025	0.205	vérifiée
2ème	929.666	2500	0.149	vérifiée
3ème	625.785	2025	0.124	vérifiée
4ème	625.785	2025	0.124	vérifiée
5ème	233.203	1225	0.076	vérifiée
6ème	233.203	1225	0.076	vérifiée
7ème	233.203	1225	0.076	vérifiée

II.7.4. Justification vis-à-vis l'effet P- Δ Tableau II. 16: justification vis-à-vis l'effet P- Δ X-X.

	h_k (cm)	P_k (Cm)	Δ_k (cm)	V_k (Cm)	θ_k (cm)	
7ème	400.00	12836.558	1.17	2095.5305	0.017	Vérifiée
6ème	320.00	27140.206	0.95	3646.4954	0.022	Vérifiée
5ème	320.00	40776.36	0.97	4894.1488	0.024	Vérifiée
4ème	320.00	55235.63	0.94	5826.0873	0.026	Vérifiée
3ème	320.00	69127.78	0.89	6625.8458	0.026	Vérifiée
2ème	320.00	83468.29	0.80	7275.0091	0.024	Vérifiée
1er	320.00	97992	0.66	7757.2492	0.021	Vérifiée
RDC	500.00	114297.09	0.60	8060.1259	0.013	Vérifiée

Tableau II. 17: justification vis-à-vis l'effet P- Δ Y-Y.

	h_k (cm)	P_k (Cm)	Δ_k (cm)	V_k (Cm)	θ_k (cm)	
7ème	400.00	12836.558	1.17	1901.1203	0.020	Vérifiée
6ème	320.00	27140.206	0.95	3329.4729	0.024	Vérifiée
5ème	320.00	40776.36	0.97	4476.6755	0.027	Vérifiée
4ème	320.00	55235.63	0.94	5439.3326	0.030	Vérifiée
3ème	320.00	69127.78	0.89	6219.189	0.031	Vérifiée
2ème	320.00	83468.29	0.80	6847.3209	0.030	Vérifiée
1er	320.00	97992	0.66	7264.699	0.028	Vérifiée
RDC	500.00	114297.09	0.60	7506.4194	0.018	Vérifiée

II.7.5. Justification du coefficient de comportement R

Nous avons choisi $R=4$ ce qui correspond au système 4b, c'est un système de portiques contreventés par des voiles

- Les voiles de contreventement doivent reprendre au plus 20% des sollicitations dues aux charges verticales.
- Les charges horizontales sont reprises conjointement par les voiles et les portiques proportionnellement à leurs rigidités relatives ainsi que les sollicitations résultants de leurs interactions à tous les niveaux.

- Les portiques doivent reprendre, en outre les sollicitations dues aux charges verticales, au moins 25% de l'effort tranchant d'étage.

➤ **Pourcentage des efforts tranchants dus aux charges reprise par les portiques :**

Tableau II. 18: Pourcentage des efforts tranchants.

	Totale	Voile	Portique	% voile	% Portique
Ex	8059.99	7240.21	819.78	89.83%	10.17%
Ey	7504.48	6775.41	729.07	90.28%	9.72%
W	125480.40	23417.42	102062.98	18.66%	81.34%

Justification:

La valeur du coefficient de comportement $R=4$ est justifiée.

Partie 5 : « ferrailages des éléments structuraux »

II.1. Introduction

Ce chapitre comporte le ferrailage des poteaux, poutres et des voiles conformément aux règles « **BAEL 91 modifié 99** », « **RPA 99 modifié 2003** » et « **Design of Concrete Structures** ».

II.2. Ferrailage des poteaux

Les poteaux sont des éléments structuraux verticaux, ils constituent des points d'appuis pour les poutres, ils transmettent les efforts vers les fondations.

Les sections des poteaux sont soumises à la flexion composée (M, N).

Une section soumise à la flexion composée peut être l'un des trois cas suivant :

- Section entièrement tendus (SET)
- Section partiellement comprimé (SPC)
- Section entièrement comprimé (SEC)

II.2.1. Combinaison d'actions

Combinaisons fondamentales selon CBA 93 (situation durable transitoire) :

$$1.35G + 1.35Q \quad ELU$$

$$G + Q \quad ELS$$

Combinaisons accidentelles selon RPA 99 (situation accidentelle) :

$$G + Q \pm E$$

$$0.8G \pm E$$

On distingue les cas suivants :

- $N_{\max}^{\text{compression}}$, $M_{\text{correspondent}}$
- $-N_{\min}=0$, $M_{\text{correspondent}}$
- $N_{\max}^{\text{traction}}$, $M_{\text{correspondent}}$
- M_{\max} , $N_{\text{correspondent}}$

II.2.2. Calcul du ferrailage des poteaux

Tableau II. 19: Calcul du ferrailage des poteaux carrés.

Niveau	Cas	Effort (kN) (kN.m)	Situation	As calculé (Cm ²) par face	
				Supérieur	Inférieur
RDC 55*55	N _{max} ⁽⁻⁾	-4324.537	E.L.U	0	3,24
	M _{corr}	51.0187			
	N _{min}	-0.914	G+Q+E	1,45	0
	M _{corr}	-35.9719			
	N _{max} ⁽⁺⁾	288.166	0.8G+E	0,83	4,93
	M _{corr}	45.1513			
	M _{max}	-112.8215	E.L.U	6	0
	N _{corr}	-4264.137			

Tableau II. 20: Calcul du ferrailage des poteaux avec voile.

Niveau	Cas	Effort (kN) (kN.m)	Situation	As calculé (Cm ²) par face	
				Supérieur	Inférieur
RDC 55*55	N _{max} ⁽⁻⁾	-1551.602	G+Q+E	0	0
	M _{corr}	-87.2279			
	N _{min}	-161.556	0.8G+E	0	0
	M _{corr}	-18.3336			
	N _{max} ⁽⁺⁾	1551.602	G+Q+E	11,55	19,48
	M _{corr}	87.2279			
	M _{max}	87.5781	0.8G+E	11,47	19,43
	N _{corr}	1544.793			

Tableau II. 21: Choix d'armatures verticales des poteaux.

	A_s^{min} BAEL	A_s^{min} RPA	A_s^{max}	
	(cm ²)	(cm ²)	(cm ²)	
Niveau	4xU	0,2%B	Z.C=4%B	Z.R=6%B
RDC (55x55)	8.8	6.05	121	181.5

Tableau II. 22: Choix d'armatures verticales des poteaux.

Niveau	Sections (cm ²)	Asmin (cm ²)	Ascalculé (cm ²)/Face	Choix d'armatures /Face	Asadp /Face (cm ²)	Choix d'armatures total	Astot (cm ²)
RDC	55x55	24.2	6	5T16	10.05	16T16	32,17
RDC (voile)	55x55	24.2	19,48	4T25	19.64	12T25	58.91

Tableau II. 23: Vérification des contraintes des poteaux à l'ELS.

Section(cm ²)	Efforts internes (kN,kN.m)		σ_{bc} (MPa)	bc (MPa)	σ_s (MPa)	s (MPa)	Vérification
RDC (55x55)	Nmax	-3110.726	10.4	15	127.1	250	Vérifié
	Mcorr	36.137					
	Mmax	-79.8369	6.8	15	167.2	250	Vérifié
	Ncorr	-3064.367					
RDC (voile) (55x55)	Nmax	-628.989	2.01	15	22.9	250	Vérifié
	Mcorr	10.2936					
	Mmax	-33.8065	0.72	15	34.8	250	Vérifié
	Ncorr	-582.375					

➤ **Vérification de la contrainte de cisaillement**

Il faut vérifier que : $\tau_u = \frac{T_u}{db} \leq \bar{\tau}_u$

Avec :

T_u : L'effort tranchant pour l'état limite ultime.

b : Largeur de la section du poteau.

d : Hauteur utile de la section du poteau.

τ_u : contrainte de cisaillement.

$\bar{\tau}_u$: contrainte limite de cisaillement du béton.

La valeur de la contrainte $\bar{\tau}_u$ doit être limitée aux valeurs suivantes :

Selon le « BAEL91 modifié 99 »

$\bar{\tau}_u = \text{Min}(0,13 \times f_{c28} ; 5\text{MPa})$ Fissuration peu nuisible.

$\bar{\tau}_u = \text{Min}(0,1 \times f_{c28} ; 4\text{MPa})$ Fissuration préjudiciable et très préjudiciable.

Selon le « RPA99 modifié 2003 »

$$\bar{\tau}_u = \rho_d f_{c28}$$

$$\rho_d = 2.5 \dots \dots \dots \text{si l'élancement } \lambda \geq 5$$

$$\rho_d = 3.75 \dots \dots \dots \text{si l'élancement } \lambda < 5$$

λ : L'élancement du poteau

$$\lambda = \frac{L_f}{a}$$

L_f : Longueur de flambement.

a : coté du poteau dans le sens du calcul.

Tableau II. 24: Vérification des contraintes de cisaillement des poteaux.

Niveaux	Section (cm ²)	Tu (kN)	τ_u (MPa)	λ	ρ_d	$\bar{\tau}_u$ (RPA) (MPa)	$\bar{\tau}_u$ BAEL) (MPa)	Vérification
RDC	(55*55)	33.67	0.111	6.36	2.5	62.5	3.25	vérifie
RDC (voile)	(55*55)	48.66	0.160	6.36	2.5	62.5	3.25	vérifie

➤ **Ferraillage transversal des poteaux**

Les armatures transversales sont déterminées à partir des formules suivantes :

$$\begin{cases} S_t \leq \text{Min}\{0.9d; 40\text{cm}\} \\ \phi_t \leq \text{Min}\left\{\frac{h}{35}; \phi_l; \frac{b}{10}\right\} \\ \frac{A_t f_e}{b S_t} \leq \text{Max}\left\{\frac{\tau_u}{2}; 0.4\text{MPa}\right\} \end{cases}$$

A_t : Section d'armatures transversales.

b : Largeur de la section droite.

h : Hauteur de la section droite.

S_t : Espacement des armatures transversales.

ϕ_t : Diamètre des armatures transversales.

ϕ_l : Diamètre des armatures longitudinales.

$$\frac{A_t}{S_t} = \frac{\rho_a T_u}{h f_e}$$

Avec :

T_u : Effort tranchant à l'ELU.

f_e : contrainte limite élastique de l'acier d'armatures transversales.

h : Hauteur totale de la section brute.

ρ_a : Coefficient correcteur qui tient compte de mode fragile de la rupture par l'effort tranchant.

λ_g : L'élancement géométrique.

L'espace des armatures transversales est déterminé comme suit :

$$S_t \leq (10\phi_j; 15\text{cm}) \rightarrow \text{zone nodale (zone II)}$$

$$S_t \leq 15\phi_l \rightarrow \text{zone courante (Zone II)}$$

La quantité d'armatures transversales minimale $A_t/(S_t b)$ en (%) est donnée comme suite :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,3\% \text{ ; si } \lambda_g \geq 5 \\ 0,8\% \text{ ; si } \lambda_g \leq 3 \\ \text{Interpolation entre les valeurs limites précédentes ; si } 3 < \lambda_g < 5 \end{array} \right.$$

Tableau II. 25: Espacement des cadres des poteaux.

Niveau	Sections (cm ²)	Ferrailage longitudinal	ϕ l (mm)	St (cm)	
				Z.N	Z.C
RDC	55x55	5T16	16	15	24
RDC (voile)	55x55	4T25	25	15	37.5

Tableau II. 26: Choix d'armatures transversales des poteaux.

Niveau	Zone	St (cm)	Tu ^{max} (kN)	λ_g	A _{tcal} (cm ²)	Choix	A _{tadp} (cm ²)
RDC	Z.N	15	33.67	6.36	0.05	4T8	2,01
	Z.C	24			0.08	4T8	2,01
RDC(voile)	Z.N	15	48.66	6.36	0.07	4T8	2,01
	Z.C	37.5			0.18	4T8	2,01

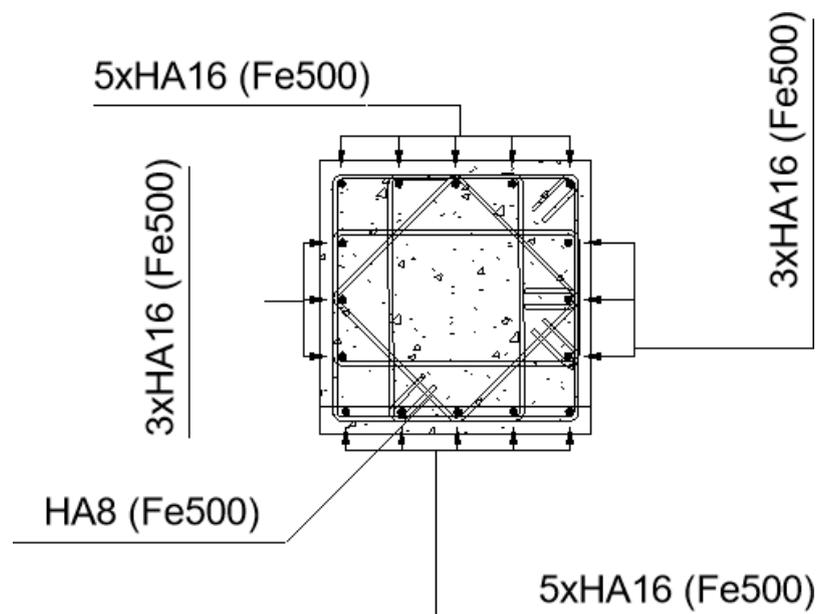


Figure II. 11: Ferrailage de poteau (55*55).

II.3. Ferrailage des poutres

Les poutres sont des éléments horizontaux qui ont pour rôle la reprise des charges leur revenant des dalles et planchers et de les transmettre aux poteaux. Travaillent en flexion simple.

- **Les combinaisons d'actions :**

Combinaisons fondamentales selon CBA 93 (situation durable) :

$$\begin{array}{ll} 1.35G + 1.5Q & \text{ELU} \\ G + Q & \text{ELS} \end{array}$$

Combinaisons accidentelles selon RPA 99 (situation accidentelle) :

$$\begin{array}{l} G + Q \pm E \\ 0.8G \pm E \end{array}$$

- **Recommandations des règlements :**

-Le pourcentage total minimum des aciers longitudinaux sur toute la longueur de la poutre est de 0,5% en toute section.

-Le pourcentage total maximum des aciers longitudinaux est de :

- 4% en zone courante.

- 6% en zone de recouvrement.

-La longueur minimale de recouvrement est de $40 \varnothing$ en zone II.

-l'ancrage des armatures longitudinales supérieurs et inférieurs dans les poteaux de rive et d'angle doit être effectué avec des crochets à 90° .

La quantité d'armatures transversales « A_t » est donnée par :

$$A_t = 0,003 \times S_t \times L$$

Avec :

L : longueur de la poutre

S_t : espacement de deux cadres consécutifs, il est donné par :

$$S_t \leq \text{Min} \left[\frac{h}{4}, 12\varnothing \right] \quad \text{Z.N}$$

$$S_t \leq \frac{h}{2} \quad \text{Z.C}$$

h : Hauteur de la poutre.

\varnothing : Diamètre maximale des barres d'acier longitudinales.

Tableau II. 27: Ferrailage des poutres.

	Combinaison	Position	Mmax (kN.m)	As ^{sup} (cm ²)	As ^{inf} (cm ²)	As ^{min} (cm ²)	As ^{max} (Z.N)	As ^{max} (Z.C)
Poutre principale (40x65)	1,35G+1,5Q	Appui	-329.6188	15.63	0	13	156	104
		Travée	165.5374	0	7.41			
	0.8G + E	Appui	108.8118	0	4.13			
		Travée	-19.3191	0.72	0			
Poutre principale (avec voile) ((40x65)	1,35G+1,5Q	Appui	-118.3642	5,69	0	13	156	104
		Travée	-4.7793	0,22	0			
	0.8G + E	Appui	82.2655	0	3,38			
		Travée	-3.2891	0,13	0			

Tableau II. 28: Choix d'armatures longitudinales des poutres.

	Position	As calcul (cm ²)	Choix	As ^{adp} (cm ²)
Poutre principale (40x65)	Appui	15.63	6T20	18.85
	Travée	7.41	6T16	12.06
Poutre principale (voile)(40x65)	Appui	5,69	8T16	16.08
	Travée	0,22	8T14	12.31

Tableau II. 29: Vérification des contraintes des poutres à l'ELS.

	Position	Mmax (kN.m)	σ_{bc} (MPa)	bc (MPa)	σ_s (MPa)	s (cMPa)	Vérification
Poutre principale (40x65)	Appui	-272.79	0	15	114.2	250	Vérifié
	Travée	63.29	3.79	15	-195.1	250	Vérifié
Poutre principale (avec voile) (40x65)	Appui	104.03	5.41	15	-242.7	250	Vérifié
	Travée	2.12	0.13	15	-6.4	250	Vérifié

- Condition de non fragilité:

$$A_s \geq A_s^{\min} = 0.23bd \frac{f_{t28}}{f_e}$$

Tableau II. 30: vérification de la condition de non fragilité.

	As adopté (cm ²)		C.N.F	Obs
Poutre porteuse (40x65)	Appui	15.71	2.51	vérifiée
	Travée	12,57		
Poutre porteuse (voile)(40x65)	Appui	12,57	2.51	Vérifiée
	Travée	12,57		

Tableau II. 31: Choix d'armatures transversales des poutres.

	Choix Ø (mm)		St (cm) ZN	St(cm) ZC	At(cm ²)	Choix
Poutre porteuse (40x65)	Appui	20	16.25	3.9	32.5	4T12
	Travée	16	16.25	3.9	32.5	4T12
Poutre porteuse (voile)(40x65)	Appui	16	16.25	3.9	32.5	4T12
	Travée	16	16.25	3.9	32.5	4T12

- Vérification de la flèche :

$$f_{\max} \leq f$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{\max} \leq \frac{L}{1000} \quad \text{si : la portée L est au plus égale à 5 m} \\ f_{\max} \leq \frac{L}{1000} + 0.5 \quad \text{si : la portée L est supérieure à 5 m} \end{array} \right.$$

Dans le cas de poutre isostatique avec une charge uniformément répartie, la flèche maximale est donnée par :

$$f_{max} = \frac{5qL^4}{384EI}$$

Avec :

f_{max} : Flèche maximale de la poutre.

L : portée de la poutre

h : hauteur de la section de la poutre.

q : charge uniformément répartie déterminé à l'ELS

E : module d'élasticité différée du béton $E = 3700(f_{c28})^{1/3}$.

I : moment d'inertie de la section $I = bh^3 / 12$

$f_{c28} = 25\text{MPa}$

$L = 7.86\text{m} > 5\text{m}$

Donc : $f_{max} \leq \frac{L}{1000} + 0.5$

$$M_{ser} = \frac{qL^2}{8} \rightarrow f_{max} = \frac{M_{ser} \times L^2}{10EI}$$

Tableau II. 32: Vérification de la flèche de la poutre.

I(mm ⁴)	E(MPa)	M _{ser} (kN. m)	f _{max} (mm)	f̄(mm)	vérification
9.15 × 10 ⁹	10818.87	104.03	6.49	8.36	Vérifié

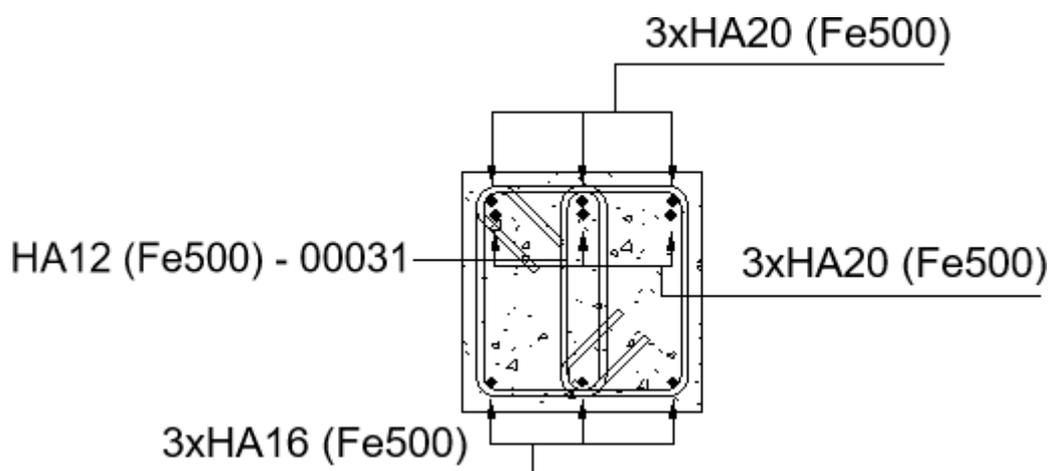


Figure II. 12: Ferrailage de poutre sur appui (40*65).

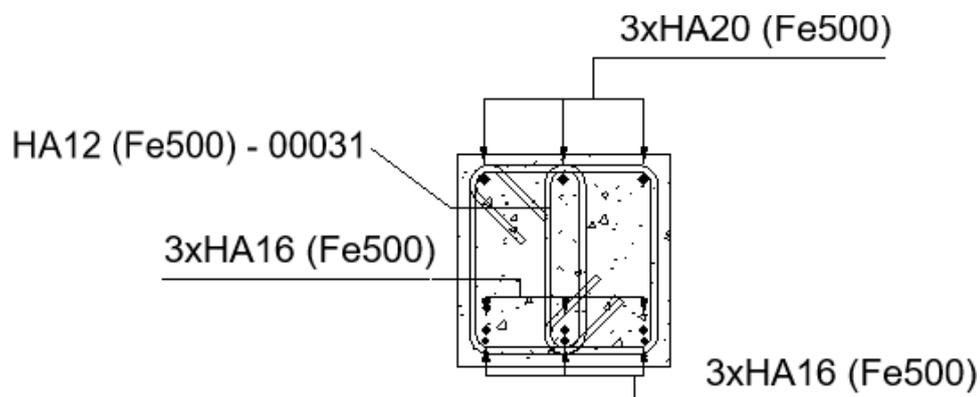


Figure II. 13: Ferrailage de poutre sur travée (40*65).

II.4. Ferrailage des voiles

II.4.1. Définition

Les voiles sont des écrans rigides ayant deux dimensions en plan (longueur, largeur) plus importantes que la troisième dimension (épaisseur).

Les voiles sont chargés dans leur plan et ont pour principales fonctions :

- De reprendre les charges verticales revenantes des planchers.
- De participer au contreventement de la structure.
- Protection contre les incendies (cages d'escaliers et ascenseurs).
- Isolation acoustique.

Les calculs des voiles en béton armé, non armé ou précontraint se fera par la méthode de modèle sandwich suivant la norme :

« DD ENV 1992-1-1 Eurocode 2 : Design of Concrete Structures. »

II.4.2. Introduction de la méthode de modèle sandwich

Le dimensionnement des armatures des coques en béton selon un champ de moments prédéterminé, tel qu'implémenté dans **SAP2000**, s'appuie sur les dispositions de la **DD ENV 1992-1-1 1992 Eurocode 2 : Design of Concrete Structures**.

Généralement, les éléments de dalle sont soumis à huit résultantes de contraintes. Dans **SAP2000** terminologie, ces résultantes sont les trois composantes de force membranaire f_{11} , f_{22} et f_{12}

Les deux composantes de moment de flexion m_{11} , et m_{22} et la torsion moment m_{12} ; et les deux composantes d'effort tranchant transversal V_{13} et V_{23} .

Pour dans le but de la conception, la dalle est conçue comme comprenant deux couches extérieures centrées sur les plans médians des couches de renforcement externes et un noyau non fissuré, ce qui est parfois appelé un "modèle sandwich". Les couvertures du le modèle sandwich (c'est-à-dire les couches externes) sont supposés supporter des moments et les efforts de membrane, tandis que les efforts de cisaillement transversaux sont affectés à l'âme, comme le montre la figure 2.14. La mise en œuvre de la conception dans SAP2000 suppose qu'il y a pas de fissures diagonales dans le noyau. Dans un tel cas, un état de cisaillement pur se développe à l'intérieur du noyau, et donc l'effort de cisaillement transversal à une section à aucun effet sur les forces dans le plan dans les couvertures sandwich.

Ainsi, pas de transversal renforcement doit être fourni, et le renforcement dans le plan n'est pas amélioré pour tenir compte du cisaillement transversal.

Les éléments suivants résument la procédure de conception de coque en béton, comme implémenté dans SAP2000 :

1. Comme le montre la figure 2.14, la dalle est conçue comme comprenant deux couches extérieures centrées sur les plans médians des nappes extérieures de renfort.
2. L'épaisseur de chaque couche est prise égale à la moindre des valeurs suivantes :
 - Deux fois la couverture mesurée au centre du renfort extérieur.
 - Deux fois la distance entre le centre de la dalle et le centre de renfort extérieur.

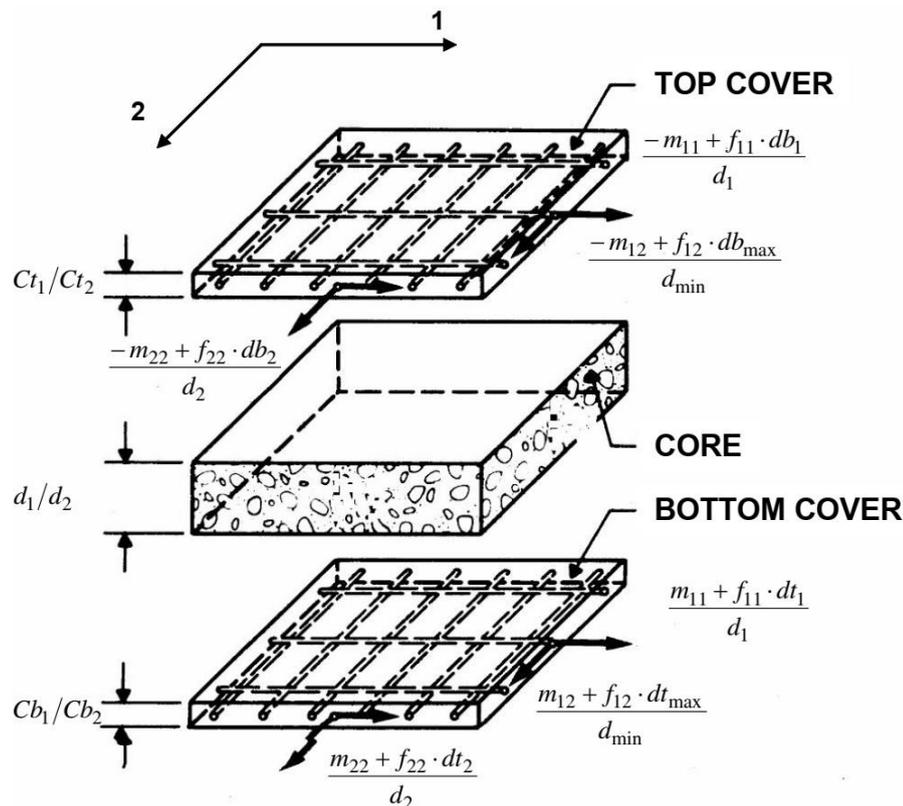


Figure II. 14: statique d'un élément « modèle sandwich ».

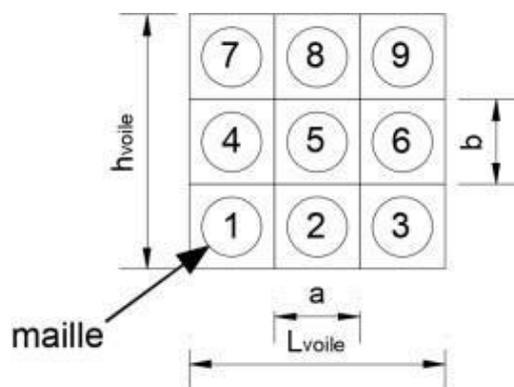


Figure II. 15: Maillage d'un voile.

3. Les six résultantes, $f_{11,22}$, f_{12} , m_{11} , m_{22} , m_{12} sont résolues en forces membranaires pures $N_{11,22}$, N_{12} calculés comme agissant respectivement dans le plan médian des couches de renfort supérieure et inférieure. En transformant les moments en forces, le bras de levier est pris comme la distance entre les couches de renfort extérieures.
4. Pour chaque couche, les efforts de ferrailage $N_{D_{es1,2}}$, béton principale efforts de compression F_{C1} , F_{C2} et contraintes de compression principales du béton S_{C1} , S_{C2} sont calculés selon les règles de l'Eurocode 2-1992.

5. Les forces d'armature sont converties en zones d'armature par unité de largeur Ast_1 et Ast_2 (c'est-à-dire les intensités de renforcement) en utilisant une contrainte d'acier appropriée et les facteurs de réduction du stress.

II.4.3. Équations de base pour la transformation résultante des contraintes en forces membranaires équivalentes.

Pour un élément de coque en béton donné, les variables h , Ct_1 , Ct_2 , Cb_1 et Cb_2 sont constantes et doivent être définies par l'utilisateur dans les propriétés de la section de zone. Si ces paramètres s'avèrent être nuls, une valeur par défaut égale à 10 pourcentage de l'épaisseur h , de la coque en béton est utilisé pour chacune des variables. Les calculs suivants s'appliquent :

$$\begin{aligned} db_1 &= \frac{h}{2} - Cb_1 \\ \begin{cases} db_2 = \frac{h}{2} - Cb_2 \\ dt_1 = \frac{h}{2} - Ct_1 \end{cases} & ; \quad \begin{cases} d_1 = h - Ct_1 - Cb_1 \\ d_2 = h - Ct_2 - Cb_2 \end{cases} \\ dt_2 &= \frac{h}{2} - Ct_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_{min} &= \min (d_1; d_2) \\ \{db_{max} &= \max (db_1; db_2); \\ dt_{max} &= \max (dt_1; dt_2) \end{aligned}$$

Les six résultantes de contrainte obtenues à partir de l'analyse sont transformées en forces de membrane équivalentes en utilisant les équations de transformation suivantes :

$$\begin{aligned} N_{11}(sup) &= \frac{-m_{11}+f_{11}db_1}{d_1} & N_{11}(inf) &= \frac{m_{11}+f_{11}dt_1}{d_1} \\ N_{22}(sup) &= \frac{-m_{22}+f_{22}db_2}{d_2} ; & N_{22}(inf) &= \frac{m_{22}+f_{22}dt_2}{d_2} \\ N_{12}(sup) &= \frac{-m_{12}+f_{12}db_{max}}{d_{min}} & N_{12}(inf) &= \frac{m_{12}+f_{12}dt_{max}}{d_{min}} \end{aligned}$$

II.4.4. Équations pour les forces de conception et correspondantes Intensités de renforcement

Pour chaque couche, les efforts de calcul dans les deux directions sont obtenus à partir des forces de membrane équivalentes en utilisant les équations suivantes selon les règles définies dans l'Eurocode 2-1992. Dans les équations ci-dessous, $m_{11}, F_{22}, F_{12}, ND_{es1}$ et ND_{es2} sont des variables temporaires.

➤ Pour le renforcement de la couche supérieure :

$$\begin{aligned} F_{11} &= N_{11}(sup) \\ \text{Si : } (sup) &\leq (sup) \text{ Alors : } \{ F_{22} = N_{22}(sup); \\ &F_{12} = N_{12}(sup) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{11} &= N_{22}(sup) \\ \text{Si : } (sup) &> (sup) \text{ Alors : } \{ F_{22} = N_{11}(sup); \\ &F_{12} = N_{12}(sup) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ND_{es1} &= F_{11} + |F_{12}| \\ \text{Si : } F_{11} &\geq -|F_{12}| \text{ Alors : } \{ ND_{es2} = F_{22} + |F_{12}|; \\ &(sup) = -2|F_{12}| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ND_{es1} &= 0 \\ ND_{es2} &= F_{22} + \frac{F_{12}^2}{F_{11}} \\ \text{Si : } F_{11} &< -|F_{12}| \text{ Alors : } \\ &(sup) = \frac{|F_{11}|}{F_{11}} [1 + \frac{\{F_{12}\}^2}{F_{11}}] \end{aligned}$$

$$\text{Si : } \begin{pmatrix} () \\ sup \leq N_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} () \\ sup \end{pmatrix} \text{ Alors : } \{ ND_{es1}(sup) = ND_{es1}; \\ ND_{es2}(sup) = ND_{es2}; \end{aligned}$$

$$\text{Si : } \begin{pmatrix} () \\ sup > N_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} () \\ sup \end{pmatrix} \text{ Alors : } \{ ND_{es1}(sup) = ND_{es2}; \\ ND_{es2}(sup) = ND_{es1}; \end{aligned}$$

➤ Pour le renforcement de la couche inférieure:

$$\begin{aligned} F_{11} &= N_{11}(inf) \\ \text{Si : } (inf) &\leq (inf) \text{ Alors : } \{ F_{22} = N_{22}(inf); \\ &F_{12} = N_{12}(inf) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{11} &= N_{22}(inf) \\ \text{Si : } (inf) &> (inf) \text{ Alors : } \{ F_{22} = N_{11}(inf); \\ &F_{12} = N_{12}(inf) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ND_{es1} &= F_{11} + |F_{12}| \\ \text{Si : } F_{11} &\geq -|F_{12}| \text{ Alors : } \{ ND_{es2} = F_{22} + |F_{12}|; \\ &(inf) = -2|F_{12}| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ND_{es1} &= 0 \\ ND_{es2} &= F_{22} + \frac{F_{12}^2}{F_{11}} \\ \text{Si : } F_{11} &< -|F_{12}| \text{ Alors : } \\ &(inf) = \frac{|F_{11}|}{F_{11}} [1 + \frac{\{F_{12}\}^2}{F_{11}}] \end{aligned}$$

$$\text{Si : } N_{11}(inf) \leq N_{22} \begin{pmatrix} () \\ inf \end{pmatrix} \text{ Alors : } \{ ND_{es1}(inf) = ND_{es1}; \\ ND_{es2}(inf) = ND_{es2}; \end{aligned}$$

$$\text{Si : } N_{11}(inf) > N_{22} \begin{pmatrix} () \\ inf \end{pmatrix} \text{ Alors : } \{ ND_{es1}(inf) = ND_{es2}; \\ ND_{es2}(inf) = ND_{es1}; \end{aligned}$$

➤ Les restrictions suivantes s'appliquent si NDes1 ou NDes2 est inférieur à zéro :

Si : $(sup) < 0$ Alors : $ND_{es1}(sup) = 0$; Si :

$ND_{es2}(sup) < 0$ Alors : $ND_{es2}(sup) = 0$; Si :

$ND_{es1}(inf) < 0$ Alors : $ND_{es1}(inf) = 0$; Si :

$ND_{es2}(inf) < 0$ Alors : $ND_{es2}(inf) = 0$;

Les forces de conception calculées à l'aide des équations précédentes sont converties en intensités de renforcement (c.-à-d. surface de barres d'armature par unité de largeur) en utilisant contrainte d'acier provenant de la propriété de matériau béton affectée à l'élément coque et le facteur de réduction des contraintes, ϕ_s . Le facteur de réduction des contraintes est supposé toujours égal à 0,9. Les équations suivantes sont utilisées :

$$\begin{cases} Ast_1(sup) = \frac{NDes1(sup)}{0.9f_y} \\ Ast_2(sup) = \frac{NDes2(sup)}{0.9f_y} \end{cases} ; \quad \begin{cases} Ast_1(inf) = \frac{NDes1(inf)}{0.9f_y} \\ Ast_2(inf) = \frac{NDes2(inf)}{0.9f_y} \end{cases}$$

f_{11} : Force directe de la membrane dans la direction locale 1

f_{22} : Force directe de la membrane dans la direction locale 2

f_{12} : Forces de cisaillement dans le plan de la membrane

m_{11} : Moment de flexion de la plaque en direction locale 1

m_{22} : Moment de flexion de la plaque en direction locale 2

m_{12} : Moment de torsion de la plaque

Application:

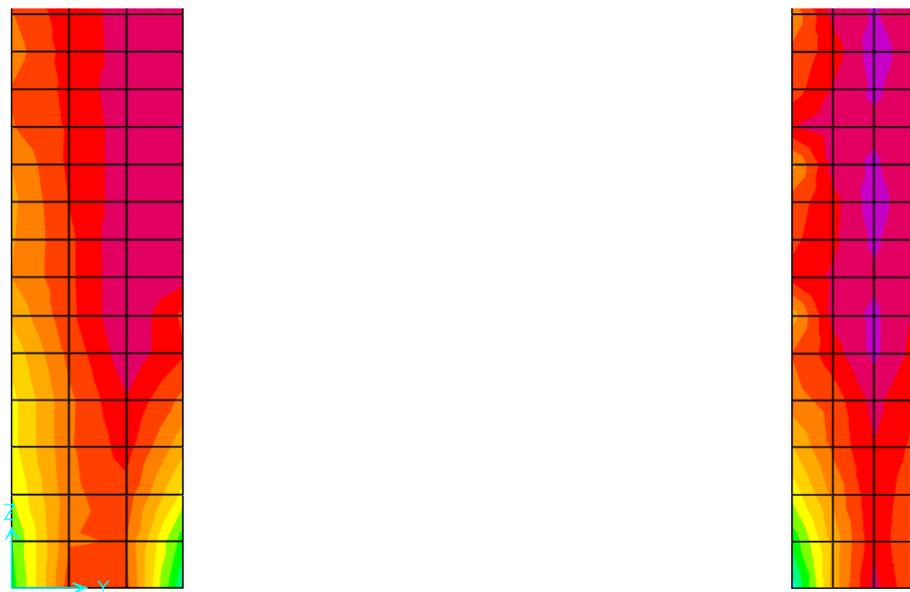


Figure II. 16: Maillage d'un voile sens Y

$$L_{voile} = 3m$$

$$H_{voile} = 5m$$

On a :

$$a = b = 1m$$

$$= 0.2m$$

$$f_y = 400MPa$$

✚ **Exemple** : On prend la première maille dans le sens Y-Y .

Tableau II. 33: les forces et les moments obtenus sur SAP2000.

	f_{11}	f_{22}	f_{12}	m_{11}	m_{22} KN.m	m_{12} KN.m
	KN	KN	KN	KN.m		
Maille 1	120.60	701.59	94.53	0.75	2.46	0.22

$$Ct_1 = Ct_2 = Cb_1 = Cb_2 \rightarrow Ct_1=0.05m$$

$$d_1 = d_2 = d_{min} \rightarrow d_1=0.1m$$

$$db_1=db_2 = db_{max} \rightarrow db_1=0.05m$$

➤ **Calcul le renforcement de la couche supérieure :**

$$N_{11}(sup) = \frac{-0.75 + 120.60 * 0.05}{0.1} = 52.8KN$$

$$N_{22}(sup) = \frac{-2.64 + 701.59 * 0.05}{0.1} = 324.395KN$$

$$N_{12}(sup) = \frac{-0.22 + 94.53 * 0.05}{0.1} = 45.065KN$$

$$F_{11} = 52.8KN$$

$$(sup) \leq (sup) \text{ Donc: } \begin{cases} F_{22} = 324.395KN \\ F_{12} = 45.065KN \end{cases}$$

$$ND_{es1} = 97.865KN$$

$$F_{11} \geq -|F_{12}| \text{ Donc : } \begin{cases} ND_{es2} = 369.46KN \\ (sup) = -90.13KN \end{cases}$$

$$N_{11} (sup) \leq N_{22} (sup) \text{ Donc : } \begin{cases} ND_{es1}(sup) = 97.865KN \\ ND_{es2}(sup) = 369.46KN \end{cases}$$

➤ Calcul le renforcement de la couche inférieure :

$$N_{11}(inf) = \frac{0.75 + 120.60 * 0.05}{0.1} = 67.8KN$$

$$N_{22}(inf) = \frac{2.64 + 701.59 * 0.05}{0.1} = 377.195KN$$

$$N_{12}(inf) = \frac{0.22 + 94.53 * 0.05}{0.1} = 49.465KN$$

$$F_{11} = 67.8KN$$

$$(inf) \leq (inf) \text{ Donc: } \{ F_{22} = 377.195KN$$

$$F_{12} = 49.465KN$$

$$ND_{es1} = 117.265KN$$

$$F_{11} \geq -|F_{12}| \text{ Donc: } \{ ND_{es2} = 426.66KN$$

$$(inf) = -98.93KN$$

$$N_{11}(inf) \leq N_{22}(inf) \text{ Donc: } \begin{cases} ND_{es1}(inf) = 117.265KN \\ ND_{es2}(inf) = 426.66KN \end{cases}$$

$$\{ Ast_1(sup) = \frac{97.865}{0.9 * 400} = 2.72cm^2$$

$$\{ Ast_1(inf) = \frac{117.265}{0.9 * 400} = 3.26cm^2$$

$$Ast_2(sup) = \frac{369.46}{0.9 * 400} = 10.26cm^2$$

$$Ast_2(inf) = \frac{426.66}{0.9 * 400} = 11.85cm^2$$

Comparaissons les calculs avec les résultats de carte graphique : On fait les résultats dans le tableau II.34 :

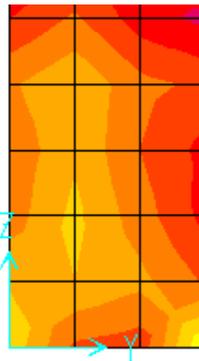


Figure II. 17: Carte graphique (*sup*)

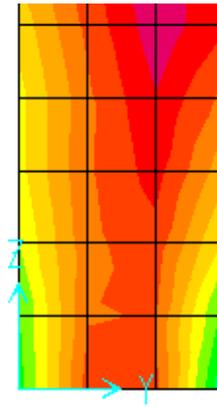


Figure II. 18: Carte graphique (*sup*)

TableauII.34: les résultats de carte graphique pour les deux phases.

		N_{11}	N_{22}	N_{12}	A_{st1}	A_{st2}	ND_{es1}	ND_{es2}
		KN	KN	KN	Cm ²	Cm ²	KN	KN
Maille 1	Supérieur	59.49	343.39	47.61	3	10.8	108.87	384.70
	inférieure	60.31	363.63	49.61	3	11	110.35	404.26

Choix pour maille 1: $\begin{cases} A_{st1} = T8 = 0.50cm^2 \\ A_{st2} = T16 = 2.01cm^2 \end{cases}; esp=15cm$

Conclusion :

Les calculs et les résultats de carte graphique sont approximativement égaux.

Calcul des elements Shell		: EN-1992-1	
(Voiles de contreventements, mur de soutènements, planchers en dalles pleines ,voutes)			
INPUT		SDA	
Type d'element	Voile de contreventement		
Hauteur de la section :	h	cm	20
enrobage des armatures de la couche superieure dans la direction 1 :	e-sup-1	cm	5
enrobage des armatures de la couche superieure dans la direction 2 :	e-sup-2	cm	5
enrobage des armatures de la couche inferieure dans la direction 1 :	e-inf-1	cm	5
enrobage des armatures de la couche inferieure dans la direction 2 :	e-inf-2	cm	5
Espacement vertical choisit top :	Sv top	cm	15
Espacement vertical choisit Inf :	Sv bot	cm	15
Espacement Horizontal choisit top :	Sh top	cm	15
Espacement Horizontal choisit Inf :	Sh bot	cm	15
Classe de Béton :		C25/30	
Classe d'acier :		B 400(B)	
Fcd	21,74	MPa	
Force directe de la membrane dans la direction locale 1 :	f11	kN	120,6
Force directe de la membrane dans la direction locale 2 :	f22	kN	701,59
Forces de cisaillement dans le plan de la membrane :	f12	kN	94,53
Moment de flexion de la plaque en direction locale 1 :	m11	kN.m	0,75
Moment de flexion de la plaque en direction locale 2 :	m22	kN.m	2,46
Moment de torsion de la plaque :	m12	kN.m	0,22

Figure II. 19: Les forces et les moments obtenus sur SAP2000.

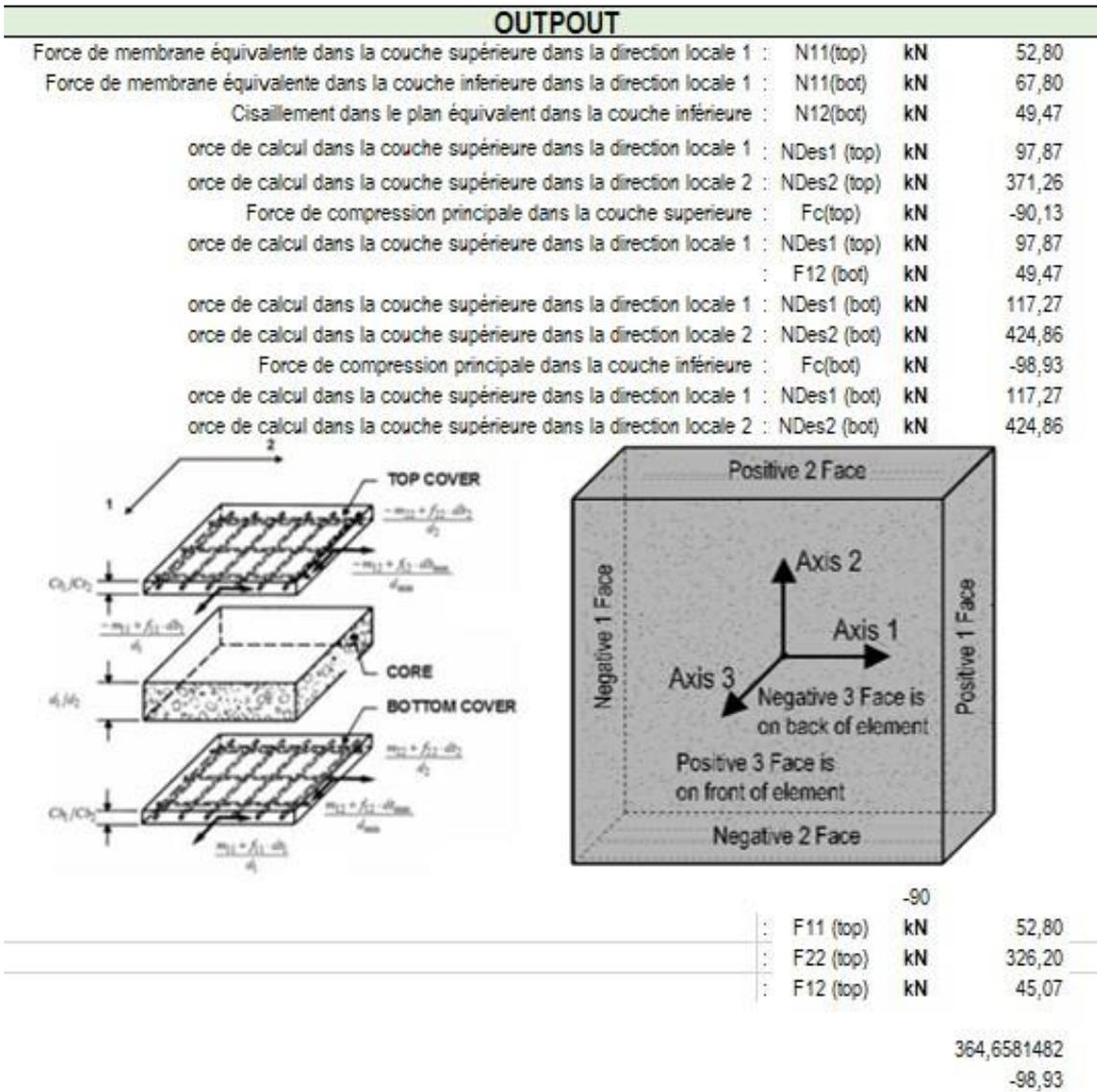


Figure II. 20: Les forces membranaires et les efforts de ferrailage par la méthode de modèle sandwich (EXCEL).

Calcul des elements Shell		: EN-1992-1
(Voiles de contreventements, mur de soutènements, planchers en dalles pleines ,voutes)		
ferraillage de la premiere direction		
Ferraillage horizontal de la nappe superieure :	Ast1(top) cm²/ml	2,72
Ferraillage horizontal de la nappe inferieure :	Ast1(bot) cm²/ml	3,26
ferraillage de la deuxieme direction		
Ferraillage vertical de la nappe superieure :	Ast2(top) cm²/ml	10,31
Ferraillage vertical de la nappe Inferieure :	Ast2(bot) cm²/ml	11,80
ferraillage Choisit		
Ferraillage vertical theorique :	cm²/ml	11,80
Ferraillage vertical theorique :	cm²/ml	11,80
Ferraillage Horizontal theorique :	cm²/ml	3,26
Ferraillage Horizontal theorique :	cm²/ml	3,26
Ferraillage Vertical choisit Top :	T16	
Ferraillage Vertical choisit Bot :	T16	
Ferraillage Horizontal choisit Top :	T8	
Ferraillage Horizontal choisit Bot :	T8	
Disposition des armatures verticales (top) :	T16 @ 15cm	
Disposition des armatures verticales (bot) :	T16 @ 15cm	
Disposition des armatures Horizontal (top) :	T8 @ 15cm	
Disposition des armatures Horizontal (bot) :	T8 @ 15cm	
Verification de la contrainte de compression		
Contrainte de compression dans la couche Superieure :	Sc (top) Mpa	0,00
verificataion de la Contrainte de compression	0,00 <	21,74 OK
verificataion de Sicaillement	0,60 <	21,74 OK

Figure II. 21: les résultats des ferrailages avec la méthode de modèle sandwich (EXCEL).

- Les deux autres mailles dans le sens Y-Y nous prenons les résultats d'Excel.

Tableau II. 34: les forces et les moments obtenus sur SAP2000.

	f_{11}	f_{22}	f_{12}	m_{11}	m_{22}	m_{12}
	KN	KN	KN	KN.m	KN.m	KN.m
Maille 2	49.12	244.48	104.89	0.26	0.52	0.21
Maille 3	77.79	505.03	86.82	0.071	0.22	0.14

Tableau II. 35: les résultats d'Excel.

	N_{11}	N_{12}	A_{st1}	A_{st2}	ND_{es1}	ND_{es2}
	KN	KN	Cm ²	Cm ²	KN	KN
Maille 2 supérieur	21.96	/	2.01	4.65	72.31	167.39
inférieure	27.16	54.55	2.27	5.06	81.71	181.99
Maille 3 supérieur	38.19	/	2.23	8.12	80.20	292.33
inférieure	39.61	44.81	2.34	8.32	84.42	299.53

Choix pour maille 2: $\begin{cases} A_{st1} = T8 = 0.50cm^2 \\ A_{st2} = T12 = 0.79cm^2 \end{cases}; esp=15cm$

Choix pour maille 3: $\begin{cases} A_{st1} = T8 = 0.50cm^2 \\ A_{st2} = T16 = 1.54cm^2 \end{cases}; esp = 15cm$

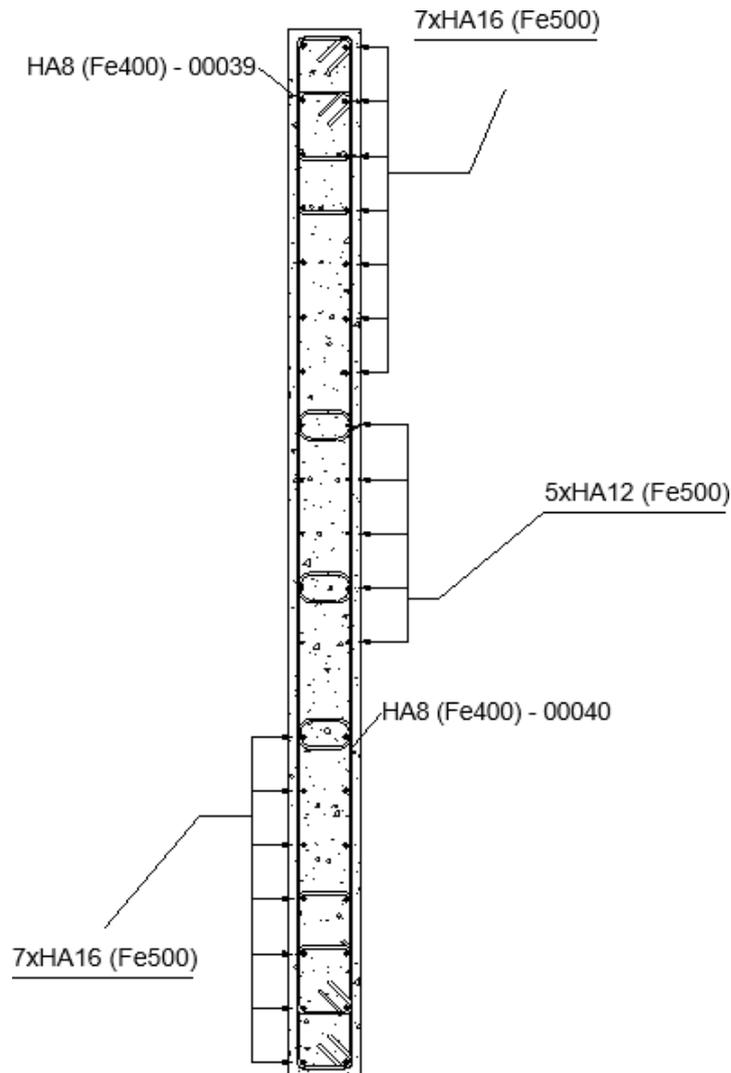


Figure II. 22: Ferrailage de voile suivant y-y.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, le calcul des structures est basé sur le « DTR » et « DD ENV 1992-1-1 1992 Eurocode 2 : Design of Concrete Structures », il commence par le Pré-dimensionnement des éléments secondaires et résistants.

L'étude dynamique, ses vérifications et ses Justifications s'effectuent en utilisant le logiciel SAP2000.

Ce chapitre termine par le ferrailage des éléments structuraux poteaux (flexion composée) et poutres (flexion simple) a été mené par le logiciel de ferrailage « SOCOTEC », alors que celui des voiles a été fait par la méthode de modèle sandwich qui est plus précise.

CHAPITRE III :
APPLICATION
DU BIM

III.1. Introduction

La modélisation des informations du bâtiment (BIM) est un processus soutenu par divers outils, technologies et contrats impliquant la génération et la gestion de représentations numériques des caractéristiques physiques et fonctionnelles des lieux. Les modèles d'information sur le bâtiment (BIM) sont des fichiers informatiques (souvent mais pas toujours dans des formats propriétaires et contenant des données propriétaires) qui peuvent être extraits, échangés ou mis en réseau. [24]

III.2. Créer une nomenclature ou une quantité**III.2.1. Définition**

La nomenclature est un système de nommage, des procédures ou des normes dans une catégorie donnée. Une nomenclature est la conception ou le choix de noms pour nommer les choses. Le principe d'attribution d'un nom peut varier, mais il est généralement basé sur des conventions relatives à l'environnement dans lequel il agit.

La nomenclature est la liste des composants nécessaires pour fabriquer ou assembler un produit. Un composant peut être une matière première, un composant acheté ou un produit semi-fini.

Il faut indiquer pour chaque composant la quantité nécessaire.

III.2.2. Les étapes pour Créer une nomenclature ou une quantité

Le cas échéant, ajoutez une liste de composants d'élément de construction à votre modèle. Cliquez sur l'onglet Vue ► le groupe de fonctions Créer ► la liste déroulante Nomenclatures ►  Nomenclature/Quantités.

Dans la boîte de dialogue Nouvelle nomenclature, procédez comme suit :

Sélectionnez un composant dans la liste des catégories. Un nom par défaut, que vous pouvez modifier le cas échéant, s'affiche dans la zone de texte Nom.

Sélectionnez Composants de construction de la nomenclature.

Remarque : Ne sélectionnez pas Création d'une table de valeurs.

Spécifiez la phase.

Cliquez sur OK.

Dans la boîte de dialogue Propriétés de la nomenclature, indiquez les propriétés de la nomenclature.

Sélectionnez Champs

- Filtrez les données à inclure dans la nomenclature
- Triez et groupez les données
- Formatez la nomenclature
- Modifiez l'apparence de la nomenclature
- Cliquez sur OK.

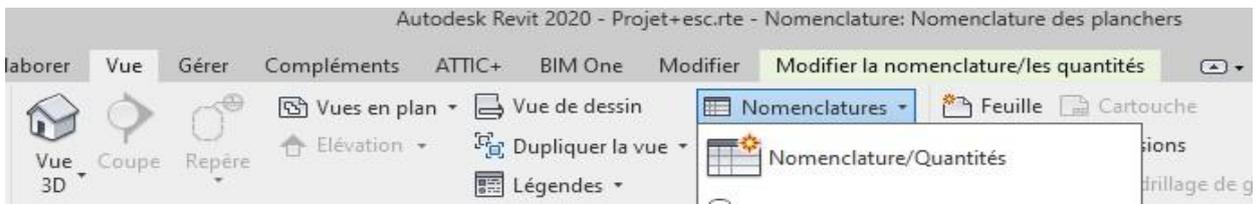


Figure III. 1: Nomenclature/Quantités.

Les nomenclatures multicatégorie ne peuvent inclure que des familles chargeables. Lorsque vous placez des paramètres partagés dans une nomenclature, les catégories qui ne possèdent pas le paramètre partagé sélectionné ne sont pas affichées dans la nomenclature. Rubriques dans cette section.

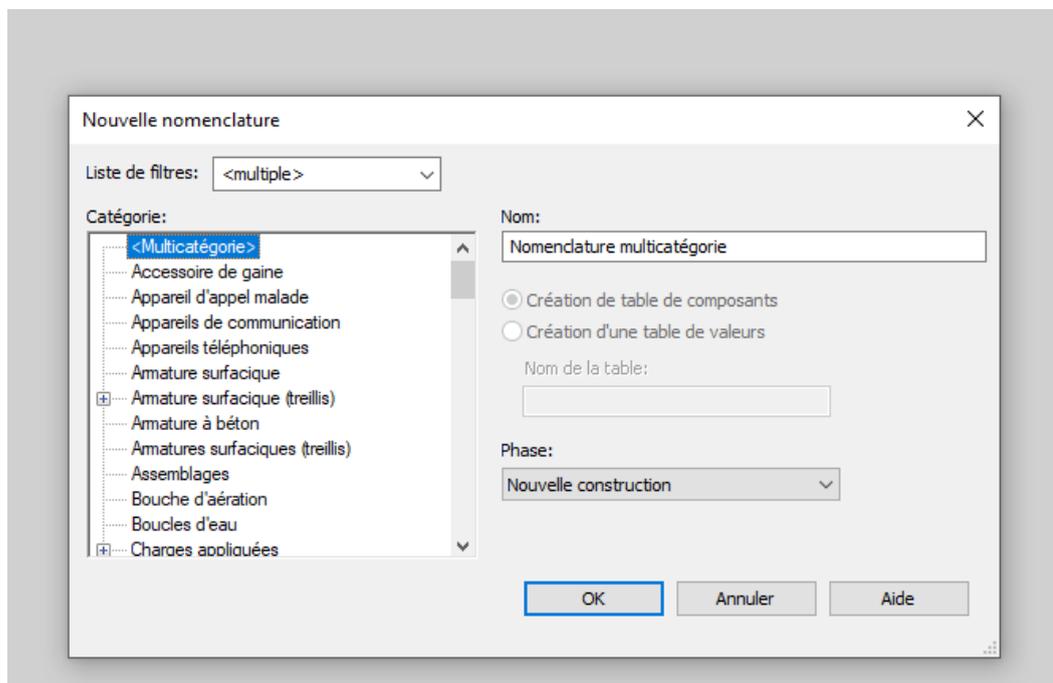


Figure III. 2: Nomenclatures multicatégorie.

➤ Sélection des champs d'une nomenclature

Lors de la création d'une nomenclature, sélectionnez les champs à inclure à l'aide de l'onglet Champs de la boîte de dialogue Propriétés de la nomenclature (ou la boîte de dialogue Propriétés du relevé de matériaux).

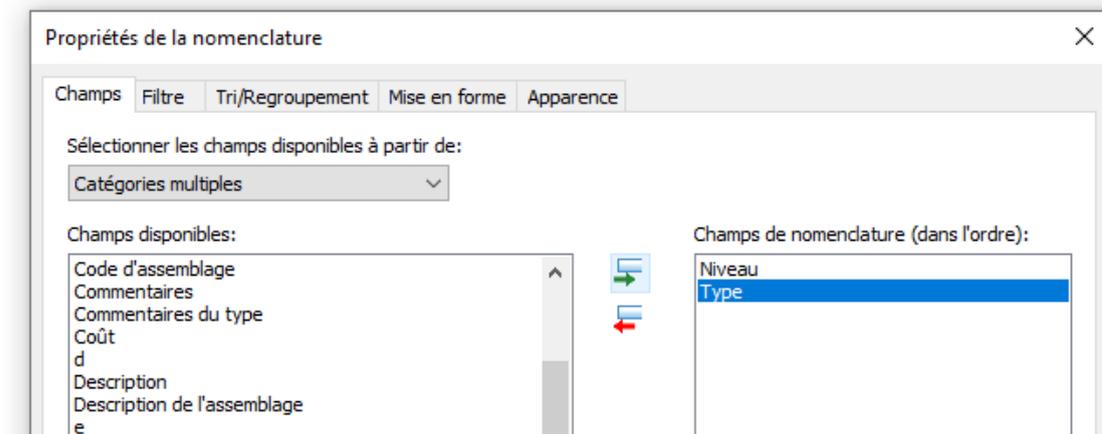


Figure III. 3: Champs d'une nomenclature

➤ **Filtrer les données dans une nomenclature**

Dans l'onglet Filtre de la boîte de dialogue Propriétés de la nomenclature (ou la boîte de dialogue Propriétés du relevé de matériaux), vous pouvez créer des filtres qui permettent de limiter l'affichage des données dans une nomenclature.

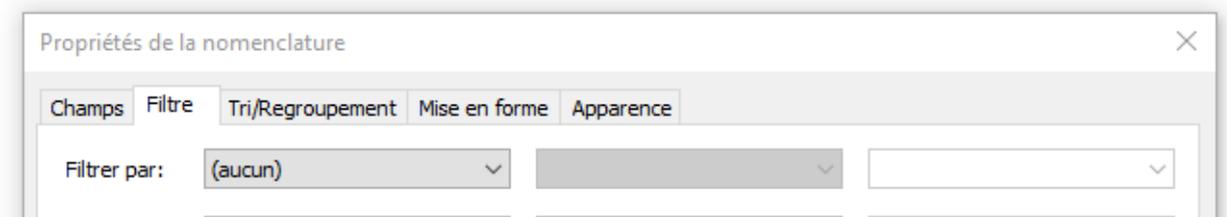


Figure III. 4: Filtre d'une nomenclature.

➤ **Trier et regrouper les champs d'une nomenclature**

Dans l'onglet Tri/Regroupement, de la boîte de dialogue Propriétés de la nomenclature (ou de la boîte de dialogue Propriétés du relevé de matériaux), vous pouvez spécifier les options de tri des lignes d'une nomenclature et ajouter des en-têtes, pieds de page et lignes vierges aux lignes triées.

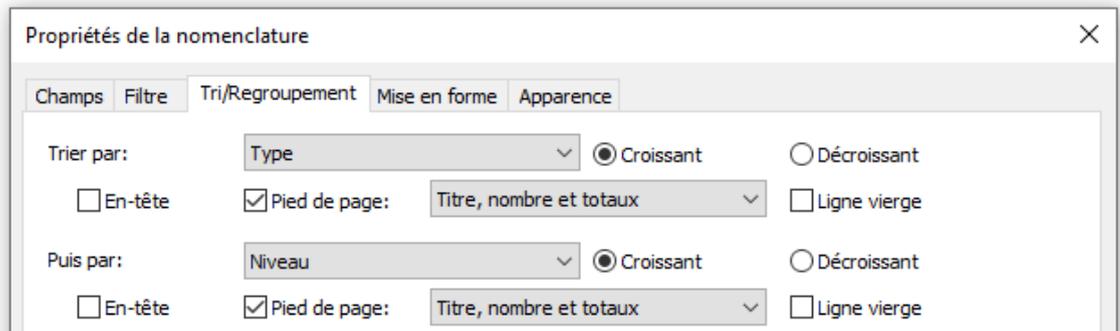


Figure III. 5: Tri/Regroupement

➤ **Ajouter des totaux généraux à une nomenclature**

Vous pouvez afficher les totaux généraux dans une nomenclature, avec un titre personnalisé pour le total général et un nombre.

➤ **Ajout des totaux des colonnes à une nomenclature**

A l'instar des feuilles de calcul, les nomenclatures permettent d'ajouter les valeurs dans une colonne pour obtenir un total de colonne.

➤ **Exemples de tri et de regroupement dans les nomenclatures**

Reportez-vous aux exemples de tri et de regroupement pour les nomenclatures, y compris le détail des occurrences, le tri et les totaux.

➤ **Mettre en forme une nomenclature**

Spécifiez différentes options de mise en forme pour une nomenclature.

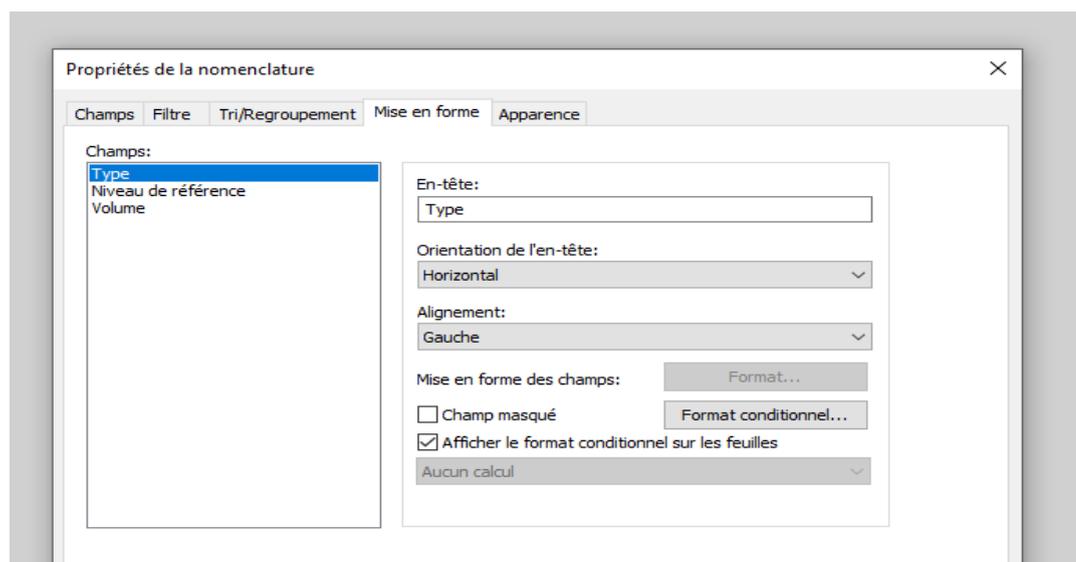


Figure III. 6: Mise en forme pour une nomenclature.

III.2.3. Créer une nomenclature ou une quantité

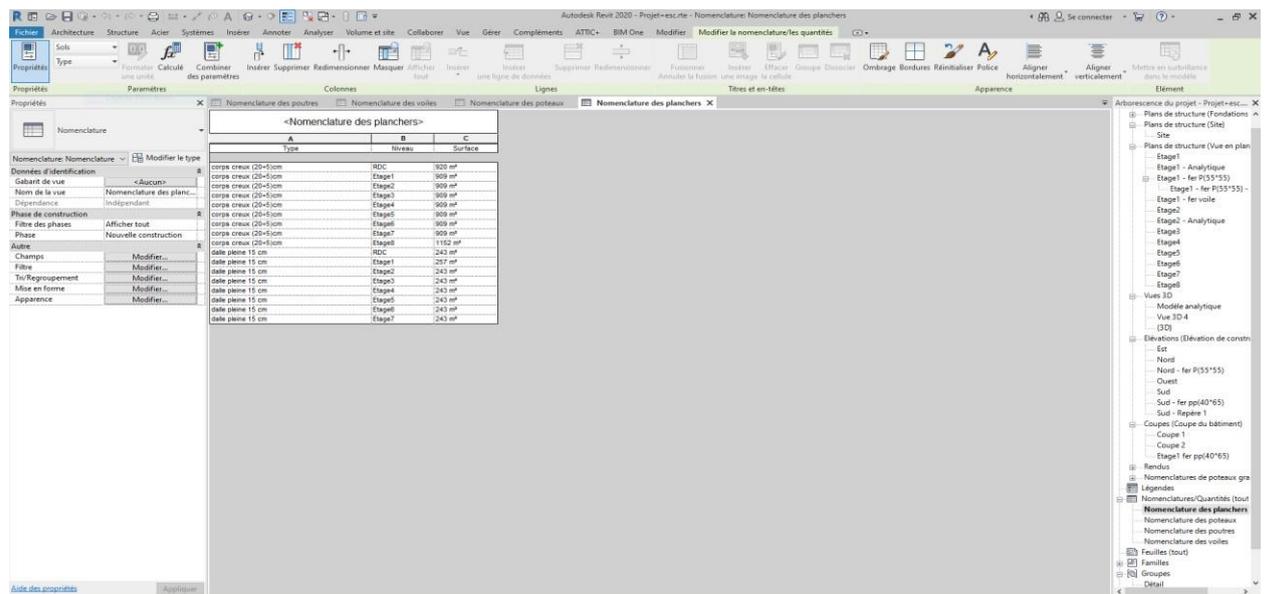


Figure III. 7: Affichage des nomenclatures ou une quantité.

A. Nomenclature des planchers:

Tableau III. 1: Nomenclature des planchers.

Type	Niveau	Surface
Corps creux (20+5) cm	Etage1	908,755 m ²
Corps creux (20+5) cm	Etage2	908,755 m ²
Corps creux (20+5) cm	Etage3	908,755 m ²
Corps creux (20+5) cm	Etage4	908,755 m ²
Corps creux (20+5) cm	Etage5	908,755 m ²
Corps creux (20+5) cm	Etage6	908,755 m ²
Corps creux (20+5) cm	Etage7	908,755 m ²
Corps creux (20+5) cm	Etage8	1151,660 m ²
Corps creux (20+5) cm	RDC	920,315 m ²
Corps creux (20+5) cm		8433,257 m ²
Dalle pleine 15 cm	RDC	1956,989 m ²
Dalle pleine 15 cm		1956,989 m ²
		10390,246 m ²

B. Nomenclature des voiles:**Tableau III. 2:** Nomenclature des voiles.

Type	Contrainte inférieure	Surface	Volume
Voile 20 cm	Etage1	185,024 m ²	37,005 m ³
Voile 20 cm	Etage2	185,024 m ²	37,005 m ³
Voile 20 cm	Etage3	185,024 m ²	37,005 m ³
Voile 20 cm	Etage4	185,024 m ²	37,005 m ³
Voile 20 cm	Etage5	185,024 m ²	37,005 m ³
Voile 20 cm	Etage6	185,024 m ²	37,005 m ³
Voile 20 cm	Etage7	231,280 m ²	46,256 m ³
Voile 20 cm	RDC	290,454 m ²	58,091 m ³
Voile 20 cm		1631,878 m ²	326,376 m ³
		1631,878 m ²	326,376 m ³

C. Nomenclature des poutres:**Tableau III. 3:** Nomenclature des poutres.

Type	Niveau de référence	Volume
300 x 450mm	Etage1	20,809 m ³
300 x 450mm	Etage2	20,797 m ³
300 x 450mm	Etage3	20,922 m ³
300 x 450mm	Etage4	21,047 m ³
300 x 450mm	Etage5	21,047 m ³
300 x 450mm	Etage6	21,047 m ³
300 x 450mm	Etage7	21,047 m ³
300 x 450mm	Etage8	17,017 m ³
300 x 450mm	RDC	18,802 m ³
300 x 450mm		182,534 m ³
400 x 650mm	RDC	286,295 m ³
400 x 650mm		286,295 m ³
		468,829 m ³

D. Nomenclature des poteaux:**Tableau III. 4:** Nomenclature des poteaux.

Type	Niveau de base	Niveau supérieur	Longueur	Volume
350 x 350mm	Etage5	Etage6	137,6	13,061 m ³
350 x 350mm	Etage5		140,8	13,216 m ³
350 x 350mm	Etage6	Etage7	137,6	13,061 m ³
350 x 350mm	Etage6		140,8	13,216 m ³
350 x 350mm	Etage7	Etage8	176	16,800 m ³
350 x 350mm	Etage7		176	16,800 m ³
350 x 350mm			457,6	43,232 m ³
450 x 450mm	Etage3	Etage4	137,6	13,061 m ³
450 x 450mm	Etage3		140,8	13,216 m ³
450 x 450mm	Etage4	Etage5	140,8	13,216 m ³
450 x 450mm	Etage4		140,8	13,216 m ³
450 x 450mm			281,6	26,432 m ³
500 x 500mm	Etage2	Etage3	140,8	22,858 m ³
500 x 500mm	Etage2		140,8	22,858 m ³
500 x 500mm			140,8	22,858 m ³
550 x 550mm	Etage1	Etage2	137,6	28,225 m ³
550 x 550mm	Etage1		140,8	28,670 m ³
550 x 550mm	RDC	Etage1	215	45,415 m ³
550 x 550mm	RDC		215	45,415 m ³
550 x 550mm			355,8	74,085 m ³
			1235,8	166,607 m ³

III.3. La collaboration BIM

La réalisation réussie d'un projet de construction nécessite la collaboration d'une équipe massive de contributeurs, mais aujourd'hui, une collaboration efficace est devenue plus difficile que jamais. Les projets n'ont fait que gagner en complexité, imposant des exigences accrues aux équipes lors de la collecte, du partage et du traitement de quantités massives de données. Pour cette raison, il existe un besoin généralisé de flux de travail connectés qui facilitent une meilleure collaboration et une meilleure coordination plus tôt dans le processus de construction.

Nulle part cela n'est plus évident qu'entre la conception et la construction. Selon un rapport de JBKnowledge, 63,5 % des entrepreneurs généraux déclarent que le cas d'utilisation le plus précieux du BIM dans la construction aujourd'hui est la coordination des modèles. Il est facile de comprendre pourquoi étant donné un récent rapport d'Autodesk et du FMI montrant que les retouches coûtent 65 milliards de dollars par an à l'industrie de la construction. Cependant, de nombreuses entreprises ont encore du mal à créer des workflows rationalisés de coordination des modèles et de conception collaborative.

➤ **Les problèmes courants incluent :**

L'échange de données de conception incohérent conduit à de multiples sources de vérité.

La détection des conflits et la gestion des problèmes reposent sur un seul utilisateur expérimenté, ce qui crée des goulots d'étranglement.

Un flux de travail déconnecté réparti sur plusieurs solutions crée des silos d'informations.

Une mauvaise collaboration numérique rend les équipes fortement dépendantes des réunions en personne et des e-mails.

Ces problèmes, tous centrés sur la collaboration, peuvent facilement entraîner des résultats commerciaux négatifs, tels qu'un risque accru de planification, des reprises et des dépassements de coûts.

- Autodesk BIM Collaboration permet aux équipes de projet d'aligner et d'exécuter l'intention de conception et la constructibilité en gérant l'ensemble du processus de collaboration et de coordination de la conception. Cela inclut l'examen et les annotations des modèles, la gestion des problèmes, l'analyse des modifications et la détection des conflits, le tout dans une seule solution basée sur le cloud dans un environnement de données commun. Le flux de travail amélioré réduit les reprises, améliore la productivité et accélère la livraison des projets.

➤ **Avantages d'Autodesk BIM Collaboration :**

Autodesk BIM Collaboration comprend des solutions de collaboration de conception et de flux de travail de coordination pour garantir que des conceptions de haute qualité arrivent sur le site.

III.4. La maquette numérique

III.4.1. La maquette structurelle

La maquette numérique de projet (MNP) est de plus en plus utilisée dans le cadre des Projets de Génie Civil et d'aménagement des grandes métropoles. Le recours à la MNP peut avoir lieu dans des cadres multiples :

- pour la coordination de la conception générale,
- pour la coordination du chantier et/ou la synthèse technique et architecturale,
- pour la production des documents d'exécution voire la fabrication à l'échelle d'une partie du Projet,
- plus rarement, pour mieux maîtriser l'ensemble des processus de conception/réalisation.

La multiplicité des outils-logiciels de conception et calcul, et la multiplicité des intervenants, complexifient les échanges tout au long du Projet. Chaque intervenant, avec son expérience et ses méthodes de travail propres, doit pouvoir rester libre de travailler sur les outils-logiciels de son choix. Le travail collaboratif permet à chaque intervenant d'utiliser les données à jour venant des autres acteurs, et de mettre en partage ses propres données.

L'agrégation de toutes les données structurelles (géométrie, caractéristiques mécaniques, modèles aux éléments finis, charges, résultats, ...) constitue une « Maquette Structurelle », qui peut être rendue visible par tous les acteurs et traduite dans le format spécifique de chaque outil-logiciel utilisé sur le Projet. La confrontation de cette maquette avec la MNP garantit la cohérence conception/réalisation.

Sur tous les projets de Génie Civil et bâtiments complexes, cette méthodologie permet de :

- Sécuriser les échanges et permettre le travail collaboratif dans toutes les phases du Projet,
- Faire un contrôle externe des études d'exécution,
- Développer un contre-modèle conforme à l'exécution. [25]

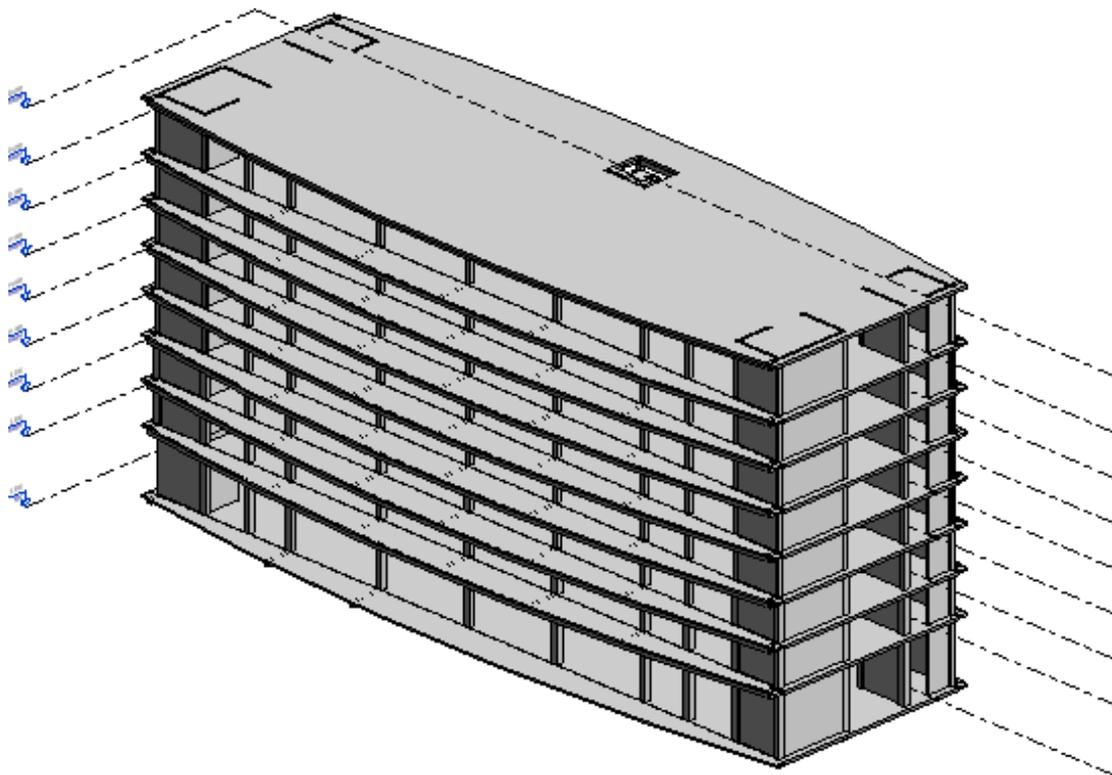


Figure III. 8: Maquette structurale (revet).



Figure III. 9: La vue transversal.

III.4.2. La maquette architecturale [Qu'est-ce qu'une maquette d'architecture? | Maquettes d'architecture \(maquettesarchitecture.fr\)](#)

La maquette est un comme moyen de conception et outil de travail, permet d'appréhender les proportions et les espaces et d'exercer la pensée en trois dimensions. On perçoit les effets des traits que l'on a dessinés sur papier.

Avec la maquette on développe une capacité d'imagination des relations spatiales contenues dans les dessins en deux dimensions.

Les maquettes sont un moyen de communication claire avec le public profane.

La maquette représente la traduction en trois dimensions de l'idée formelle et se place au même niveau conceptuel. [26]

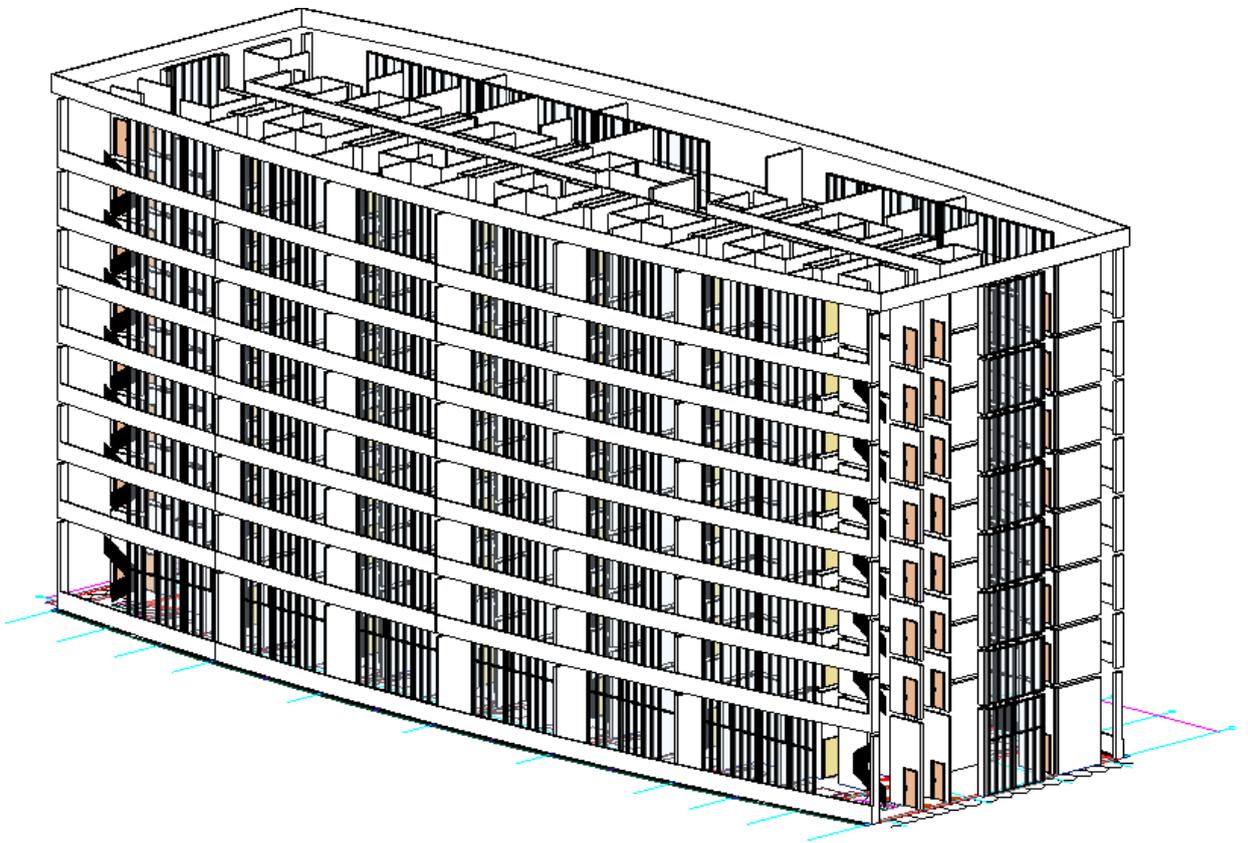


Figure III. 10: Maquette architecturale (revit).

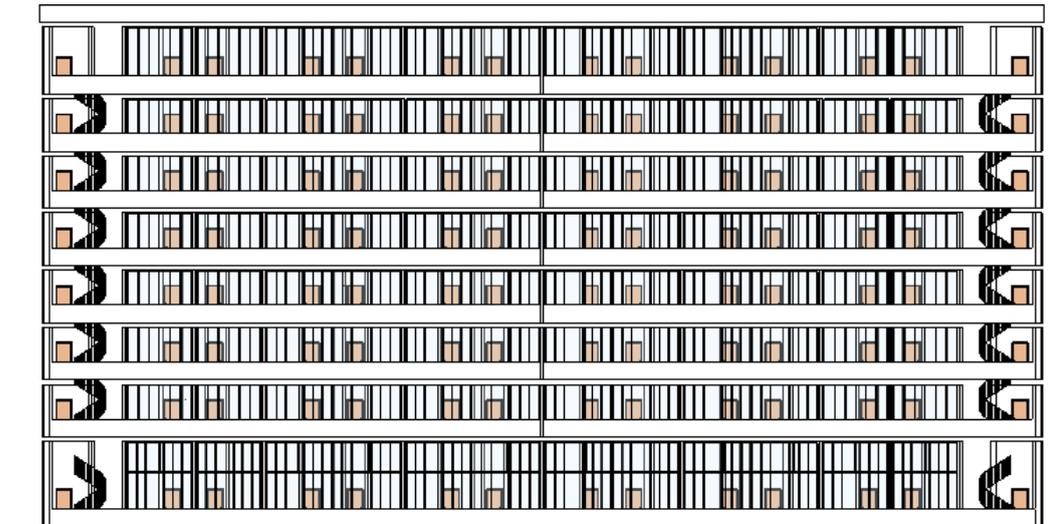


Figure III. 11: La vue longitudinal.

III.5. La détection des clashes

III.5.1. Définition

La conception technique est un domaine dynamique qui nécessite une coordination efficace entre plusieurs parties prenantes pour obtenir les résultats souhaités. À l'ère actuelle, tout projet de conception de construction implique de multiples parties prenantes telles que des ingénieurs en structure, des architectes, des entrepreneurs, des fournisseurs et des vendeurs, ce qui rend parfois le processus d'achèvement du projet très complexe.

De plus, l'ensemble de l'écosystème de conception et de construction de bâtiments est confronté au défi de terminer les projets dans les délais. Dans un tel scénario, l'exactitude et la précision sont essentielles pendant la phase de conception. [27]

III.5.2. Avantages de la détection des clashes

La détection des clashes BIM présente plusieurs avantages, dont les plus importants sont présentés ci-dessous:

- ✓ La détection des clashes aide à minimiser les erreurs de coordination et les différences d'opinion entre les personnalités de différents domaines.
- ✓ L'un des meilleurs avantages de la détection des clashes est qu'elle supprime les différents conflits de conception qui se produisent et rend le projet sans erreur.
- ✓ La détection de collision aide également à minimiser le coût global du projet au moment de l'installation et de la phase de construction. [27]

III.5.3. Les étapes de la détection des clashes

On utilisant Autodesk revit pour afficher la détection des clashes.

- D'abord, on crée la maquette numérique.
- Cliquant sur : **Insérer** → **Lier Revit**.

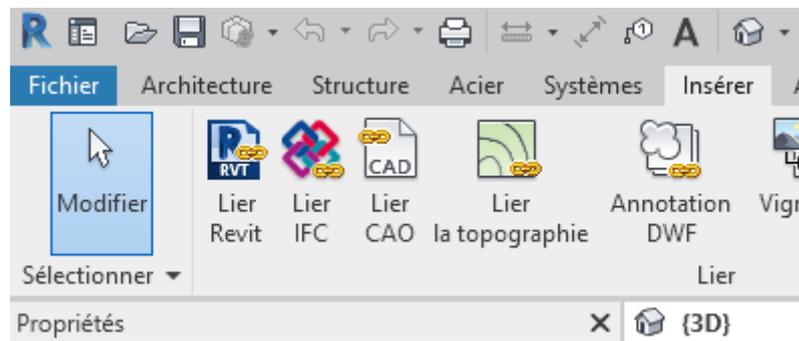


Figure III. 12: Onglet Lier Revit.

- On choisit le modèle architectural pour lier avec le modèle structurel ; précisant le positionnement: **Automatique – point de base du projet vers point de base du projet** → ouvrir

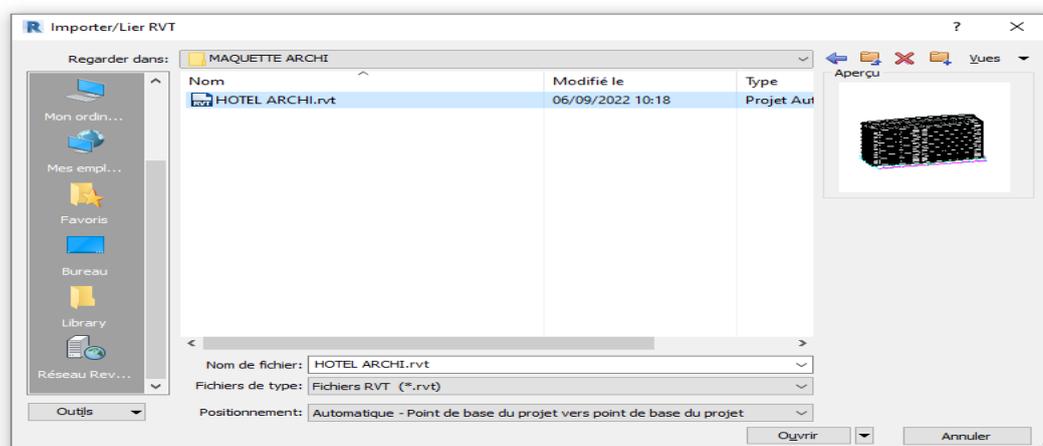


Figure III. 13: Lier les maquettes.

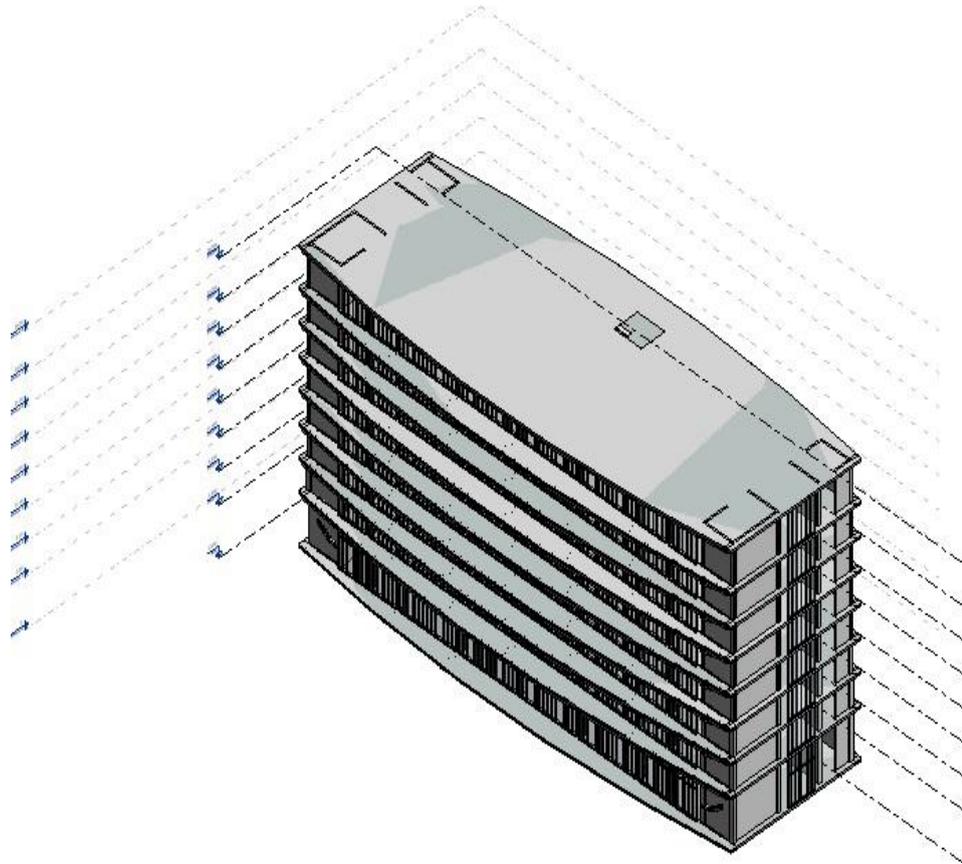


Figure III. 14: La maquette numérique.

- Ensuite, on lance le rapport des interférences.
- Cliquant sur : **Collaborer** → **Vérification des interférences** → **Exécuter la vérification des interférences**.

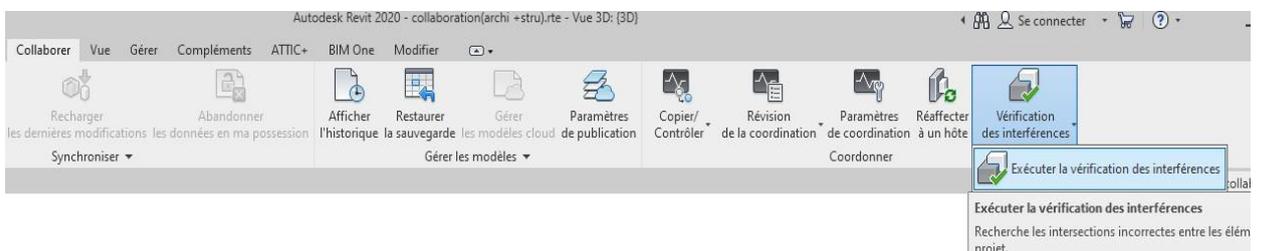


Figure III. 15: Exécuter la vérification des interférences.

- Dans la boîte de dialogue : **Vérification des interférences**, on choisit la catégorie Catégories depuis projet en cours : la maquette structurelle.
Catégories depuis le model lier : la maquette architecturale.

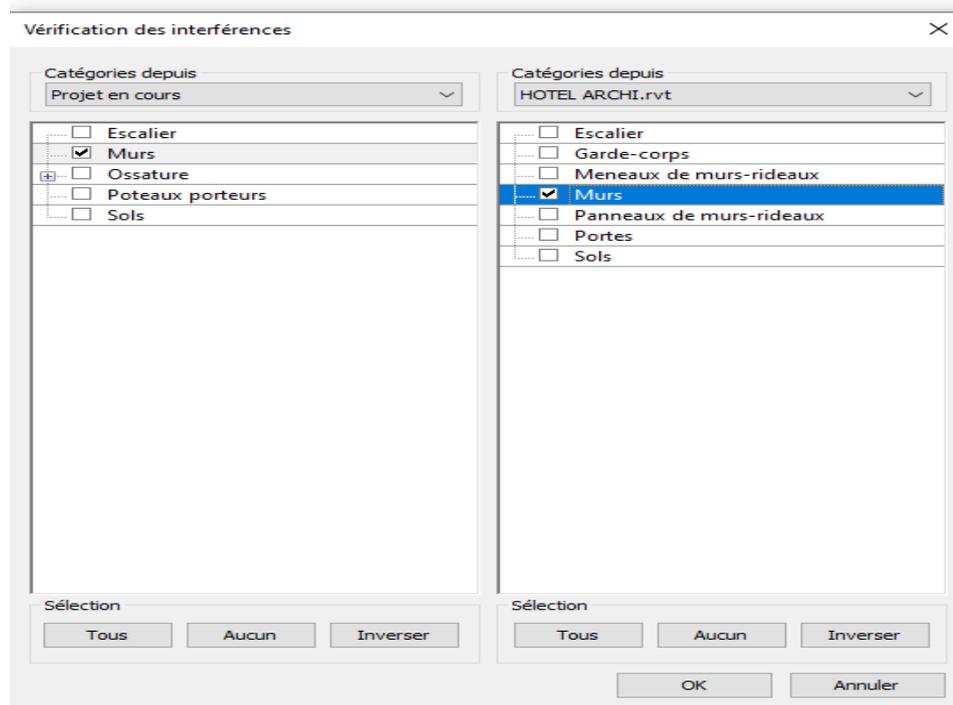


Figure III. 16: Catégorie depuis un projet.

- Cliquant sur : **OK**.

Une nouvelle fenêtre s'affiche, illustrant le rapport sur les interférences. Chaque détection de clash précisée avec identifiant architecturale et structurale respectif.

À chaque élément on affecte un identifiant, dont l'objet est de distinguer cette élément.

- Identifiant architecturale : dans la maquette architecturale.
- Identifiant structurale : dans la maquette numérique et structurale.

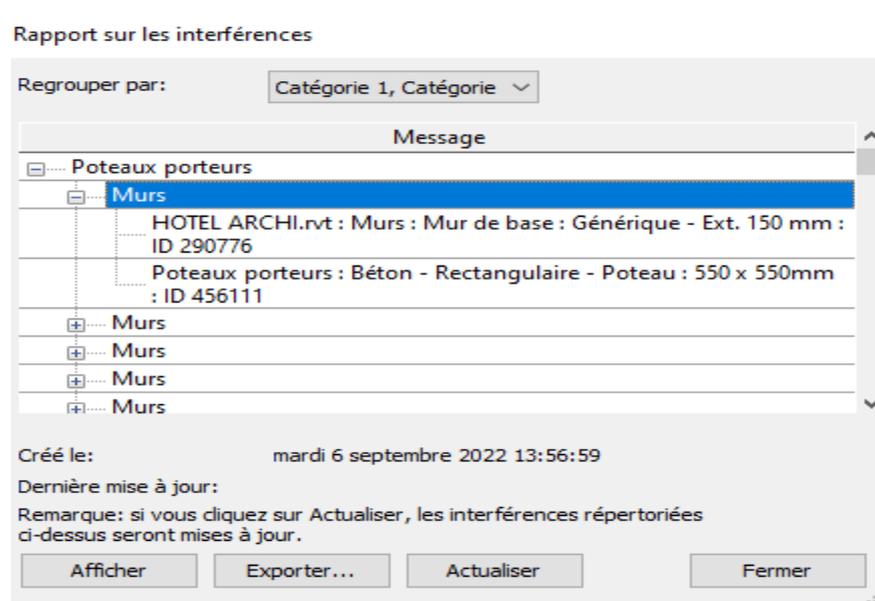


Figure III. 17: Rapport sur les interférences.

- Cliquant sur : **Afficher** → **Fermer**.
- Affichage de détection des clashes.
- Sélection par identifiant : **Gérer** → **Sélection par identifiant**.

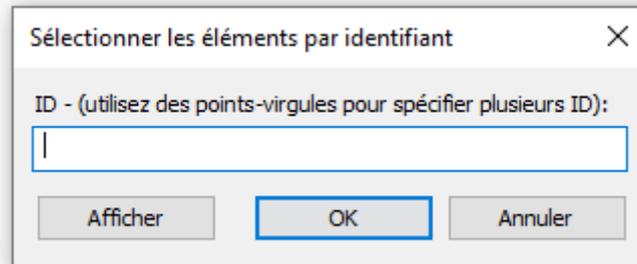


Figure III. 18: Onglet d'identifiant.

- Écrivez le ID et on cliquant sur : **OK**.
- ✚ **Exemple1:** Affichage de détection des clashes d'un mur depuis projet en cours et mur depuis le model lier.

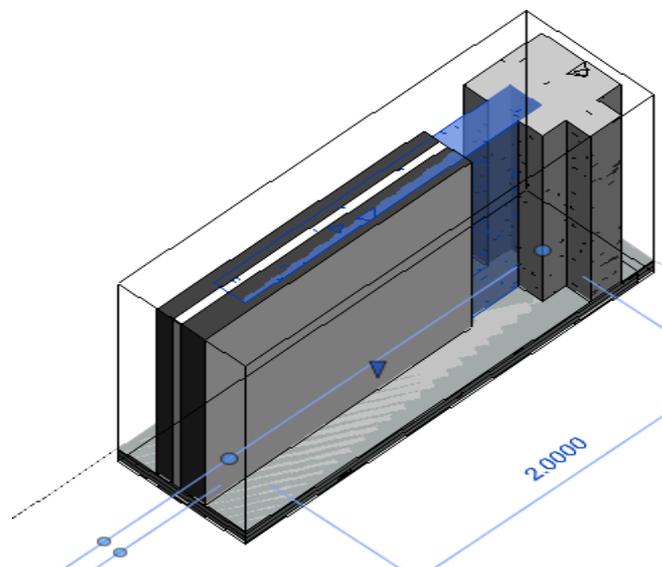


Figure III. 19: Affichage de détection des clashes.

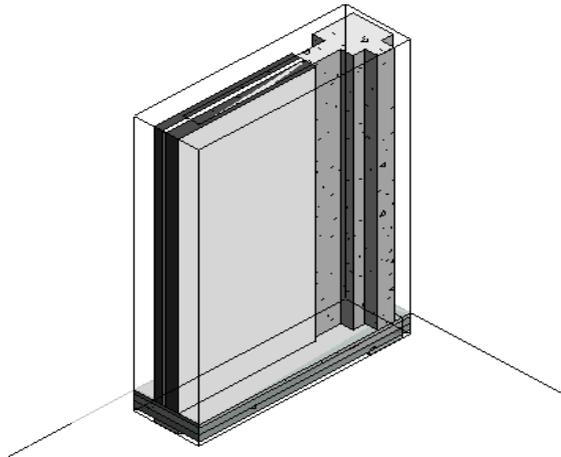


Figure III. 20: Affichage de détection des clashes

- + **Exemple2:** Affichage de détection des clashes d'un poteau depuis projet en cours et mur depuis le model lier.

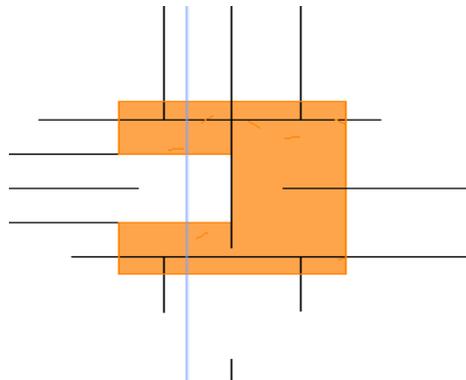


Figure III. 21: La détection des clashes en 2D.

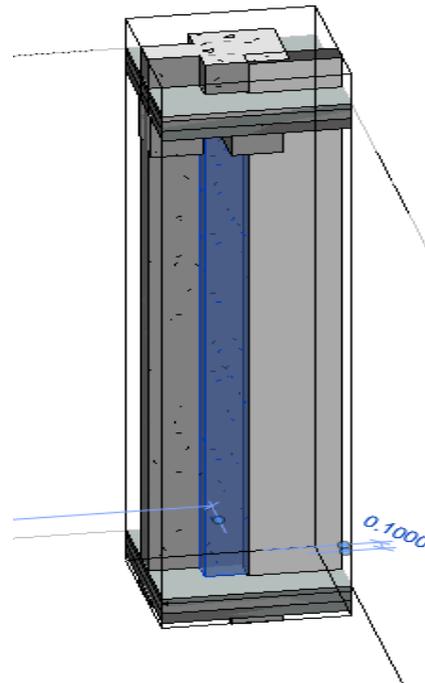


Figure III. 22: Affichage de détection des clashes.

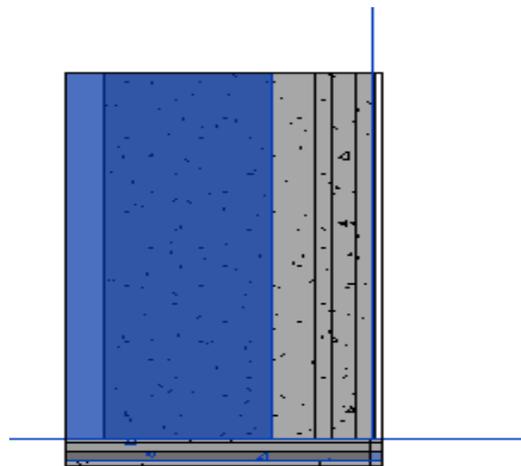


Figure III. 23: Détection des clashes.

III.6. Conclusion

La détection des clashes BIM est devenue l'une des fonctionnalités qui améliorent grandement les processus des projets de construction modernes, notamment en ce qui concerne la collaboration entre les différentes parties prenantes. La détection des clashes est une bouffée d'air frais bien nécessaire pour un secteur qui a déjà beaucoup à faire en général.

Conclusion Générale

Compte tenu de tous les avantages et usages du logiciel de modélisation BIM 3D, il est facile de dire que ce logiciel continuera à jouer un rôle important dans l'avenir des projets de construction.

Ce programme permet aux entreprises de réduire leurs coûts et de respecter les réglementations environnementales de manière efficace et efficiente.

Le BIM réduit les erreurs, du développement au montage.

L'implémentation d'un logiciel de modélisation BIM dans les projets de construction, du développement à la conception en passant par l'installation, est une étape logique qui vous fera économiser de l'argent, du temps et des efforts.

L'utilisation du BIM permet à l'équipe de construction d'accéder aux données requises à toutes les étapes du développement, de la conception, de la construction et de la démolition éventuelle du bâtiment.

La technologie BIM aide à résoudre et à éviter les problèmes potentiels lors de la phase de conception du projet. La représentation visuelle du bâtiment permet d'identifier les problèmes et les obstacles entre les systèmes structurels, l'architecture et le MEP.

En fait, identifier et modifier ces problèmes tôt dans la phase de conception permet d'économiser beaucoup de temps et d'argent pendant le processus d'assemblage. L'utilisation du BIM est particulièrement essentielle pour les projets avec des budgets serrés et des délais serrés.

Même la détection d'un conflit permet de gagner du temps en découvrant des problèmes dans la structure d'un bâtiment. Lorsque la détection de collision est effectuée à l'aide du BIM, les problèmes avec les éléments de construction sont mis en évidence dans le modèle informatique.

Référence

- [1] www.objectif-bim.com
- [2] Aryani, A; Suzila, M; Narimah, K; Mohamad, S. Article. Building Information Modeling (BIM) Application in Malaysian Construction Industry. 2013)
- [3] Azhar,S; Khalfan,M; Maqsood, T. Building information modelling (BIM): now and beyond. *Construction Economics and Building*. 2015.
- [4] publications.cms.bgu.tum.de/books/bim_2018/01_
- [5] bimforum.org/wp-content/uploads/2022/02/BIMForum_LOD_2019_reprint.
- [6] Chuck,E; Paul, T; Rafael, S and Kathleen, L. A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors. 2008.
- [7] biblus.accasoftware.com/fr/dimensions-du-bim/
- [8] Le siège social du CIDJ, le Centre de formation, un espace de costudying, événementiel et d'ateliers
- [9] LAURE, C, 2014, LA MAQUETTE NUMÉRIQUE À L'ÈRE DU BIM.
- [10] <https://www.obat.fr/blog/meilleurs-logiciels-bim/>
- [11] Ondrej, last modified by Amna on Jun 15, 2021, ETABS.
- [12] wikipedia.org/wiki/SAP2000
- [13] <https://www.bimmodel.co/single-post/2016/09/05/what-interopability-really-means-in-a-bim-context>
- [14] Magazine BIM Manager, 2013, fichier ouvert, Acronyme de Industry foundation classes.
- [15] <https://objectif-bim/bim-maquette-numerique/le-bim-en-bref/avantages-du-bim>
- [16] <https://formations.batiactu/formation-decideurs---passer-au-bim-avantages-inconvenients->
- [17] <https://www.autodesk/solutions/bim/civil-engineering>
- [18] <https://civil-engineering-ebook-benefits-of-bim-ko-v2>.
- [19] Sattler, L. Amélioration de l'interopérabilité BIM via un cadre de co-modélisation par requêtes et enrichissements itératifs de données. Automatique / Robotique. HESAM Université, 2021.
- [20] Règlement Parasismique Algérien (RPA 99 modifié 2003).

- [21] Règles BAEL91 modifié 99
- [22] DTR (32 DTR algériens)
- [23] DD ENV 1992-1-1 1992 Eurocode 2: Design of Concrete Structures (CONCRETE SHELL REINFORCEMENT DESIGN)
- [24] Eastman, C; Fisher, D; Lafue, G; Lividini, J; Stoker, D; Yessios, C. Building information modeling. (September 1974).
- [25] Journées GC'2017 les 15 et 16mars 2017– Cachan
- [26] La maquette architecturale et urbaine.
- [27] <https://www.united-bim.com/what-is-clash-detection-in-bim>

