



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
École nationale polytechnique Alger



Département de Génie civil

Mémoire de projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie civil

Thème :

Analyse de la Superstructure d'un Bâtiment (R +6+02 SS) et Introduction à la Maquette Numérique BIM

Réalisé par :

Mme Lynda BOUCHEKAL

Proposé et dirigé par :

Ing. H. Bentalebi
Dr. N. BAUCHE

Devant la commission d'évaluation :

Pr. N. Bourahla
Pr. A. Bourzam
Dr. N. Baouche

Président
Examinateur
Encadrante



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
École nationale polytechnique Alger



Département de Génie civil

Mémoire de projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie civil

Thème :

Analyse de la Superstructure d'un Bâtiment (R +6+02 SS) et Introduction à la Maquette Numérique BIM

Réalisé par :

Mme Lynda BOUCHEKAL

Proposé et dirigé par :

Ing. Hakim
Dr. N. BAUCHE

Devant la commission d'évaluation :

Pr. N. Bourahla
Pr. A. Bourzam
Dr. N. Baouche

Président
Examinateur
Encadrante

ملخص

مشروع نهاية الدراسة يتناول تحليل الهيكل الفوقي لمبنى من ستة طوابق بالإضافة إلى طابقين تحت الأرض. يتم فيه وضع فرضيات الحسابات باستناد إلى خصائص المواد المستخدمة. بعد ذلك، يجري تحليل دينامي للهيكل الفوقي لتقييم سلوكه تجاه الأحمال الزلزالية. يتضمن المشروع أيضًا تصميم تسليح عناصر الهيكل الفوقي وفقًا للمعايير الزلزالية الجزائرية. بالإضافة إلى ذلك، يقوم المشروع باستكشاف عمليات تصميم النموذج الرقمي ونمذجة معلومات المدينة أخيرًا، يقدم منهجية مفصلة تصميم النموذج الرقمي داخل الشركة

Abstract

The final year project addresses the analysis of the superstructure of an R+6 building with 02 basement levels. It establishes calculation assumptions based on the characteristics of the materials used. Subsequently, dynamic analysis of the superstructure is conducted to assess its behavior under seismic loads. The project also includes the design of the reinforcement of superstructure elements in accordance with Algerian seismic regulations. Furthermore, the project explores the processes of digital model creation, emphasizing key concepts of Building Information Modeling (BIM) and City Information Modeling (CIM). Finally, it offers a detailed methodology for the successful implementation of a BIM process within a company.

Résumé

Le projet de fin d'étude aborde l'analyse de la superstructure d'un bâtiment R+6 avec 02 sous-sols. Établissant les hypothèses de calcul en se basant sur les caractéristiques des matériaux utilisés. Ensuite, l'analyse dynamique de la superstructure pour évaluer son comportement vis-à-vis les charges sismiques. Le projet inclut également la conception du ferrailage des éléments de la superstructure conformément aux règles parasismiques algériennes. De plus, le projet explore les processus de modélisation de la maquette numérique, en mettant en avant les concepts clés du BIM (Building Information Modeling) et du CIM (City Information Modeling). Enfin, il propose une méthodologie détaillée pour la mise en œuvre réussie d'un processus BIM au sein d'une entreprise.

الكلمة المفتاحية: النمذجة , ديناميكي , التصنيع المتكامل بواسطة الحاسوب , الهيكل العلوي نمذجة , المعلومات للمباني رقمي.

Key words: Modeling, Superstructure, BIM (Building Information Modeling), CIM (City Information Modeling), Dynamics, Digital.

Mots clés : Modélisation, Superstructure, BIM, CIM, Dynamique, Numérique

Remerciements

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à mon encadrante, Madame Baouche Nadja, pour son précieux accompagnement, sa disponibilité, son soutien et ses conseils tout au long du développement de ce projet.

Je suis particulièrement admirative pour le temps et l'attention qu'elle a consacrés à mes questions, même les plus complexes. Elle m'a donné de précieux conseils qui m'ont permis de progresser dans mon travail. Son soutien moral a été d'une grande importance pour moi.

Je remercie également la société CSCEC pour son accueil chaleureux et son encadrement précieux au cours de mon stage. J'ai été très impressionnée par la qualité de l'équipe et par la richesse des opportunités qui m'ont été offertes. En particulier, je tiens à remercier les ingénieurs du département d'études, Monsieur Talbi Abd El-Hakim, Monsieur Chellahi Mohammed Samy et Monsieur Bouyahi Mohammed, pour leur enseignement et leur soutien. J'ai eu l'occasion de participer à des projets concrets qui m'ont permis de mettre en pratique mes connaissances et de développer mes compétences.

Je suis également très reconnaissante pour la qualité de l'enseignement que j'ai reçu de la part des enseignants du département génie civil de l'école nationale polytechnique. Ils m'ont transmis leur passion pour le génie civil et m'ont donné les outils nécessaires pour réussir ma carrière.

Je suis profondément admirative pour l'aide et le soutien que j'ai reçus de toutes ces personnes. Grâce à elles, j'ai pu réaliser ce projet et progresser dans ma formation. Je suis impatiente de poursuivre ma collaboration avec elles dans le futur.

Dédicaces

À mon père, Abdel Ouahid Bouchekal

Tu as toujours été là pour moi, avec ton amour, ta gentillesse et ta bienveillance infinie. Tu m'as soutenue, encouragée et guidée tout au long de mon parcours. Tu m'as appris à être forte et indépendante. Je suis la femme que je suis aujourd'hui grâce à toi.

À ma mère, Kenza Benamara

Ce travail est un hommage à ta mémoire et à l'amour éternel que je te porte. Tu m'as donné la vie et tu m'as appris à aimer, à rire et à rêver. Tu es toujours dans mon cœur.

À ma sœur Amira et mon frère Rahim

Vous êtes ma famille, mes meilleurs amis. Vous m'avez toujours soutenue, même dans les moments difficiles. Je suis tellement reconnaissante de vous avoir dans ma vie.

À ma cousine, Meriem Chaa

Tu es ma confidente, ma complice. Tu as toujours cru en moi, même quand j'avais du mal à y croire moi-même. Tu es une part importante de ma vie.

À ma cousine Sarah Radja

Je te souhaite tout le bonheur et la réussite du monde. Que nos chemins continuent à se croiser.

À mes amies Khadidja Yelles et Meriem Sekoum

Vous êtes mes piliers, mes inspirations. Vous m'avez aidée à devenir la femme que je suis aujourd'hui. Je suis si heureuse de vous avoir dans ma vie.

Je suis profondément reconnaissante de votre soutien et de votre amour. Vous êtes ma force et ma motivation.

Table des matières

LISTES DES SYMBOLES

LISTES DES TABLEAUX

LISTES DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE.....	15
I. Description de l'ouvrage	17
I.1 Introduction	18
I.2 Présentation générale du projet	18
I.3 Règlements en vigueur	18
I.4 Aperçu général du site.....	18
I.4.1 Situation géographique.....	18
I.4.2 Caractéristiques géométriques.....	19
I.4.1 Plans Structure.....	19
I.4.2 Ossature et système constructif adopté.....	20
I.5 Caractéristiques géotechniques du sol.....	21
I.6 Fondations	22
I.7 Conclusion :.....	22
II. Caractéristiques des Matériaux.....	23
II.1 Introduction	24
II.2 Béton	24
II.2.1 Résistances mécaniques du béton.....	24
II.2.1.1 Résistance caractéristique du béton à la compression	24
II.2.2 Résistance caractéristique à la traction.....	24
II.2.3 Déformation longitudinale du béton :.....	25
II.2.4 Déformation transversale du béton :.....	25
II.2.5 Etats Limites.....	25
II.2.5.1 Les états limites ultimes (E.L.U).....	25
II.2.5.2 Les états limites de services (E.L.S).....	27
II.3 Acier.....	28
II.3.1 Types d'aciers.....	28
II.3.2 Caractéristiques mécaniques de l'acier	29
II.3.3 Etats Limites.....	29
II.3.3.1 Les états limites ultimes (E.L.U).....	29
II.3.3.2 Etat Limite Service (ELS)	29
II.4 Actions et sollicitations	30
II.4.1 Actions :	30
II.4.2 Sollicitations.....	30
II.4.2.1 Sollicitations de calcul vis-à-vis des états limites ultimes de résistance :	30

II.4.2.2	Sollicitations de calcul vis-à-vis des états limites de service	31
II.5	Hypothèses de calcul	31
II.5.1	Evaluation des charges et des surcharges	31
II.5.2	Résumé des caractéristiques des matériaux	33
II.6	Effet de la température	33
II.6.1	Coefficient de dilatation thermique	34
II.6.2	Contraintes thermiques	34
II.6.3	Convention de signes	34
II.6.4	Procédure de calcul	34
II.7	Conclusion	34
III.	Calcul Dynamique	35
III.1	Introduction	36
III.2	Classification de l'ouvrage	36
III.3	Choix de la méthode de calcul	36
III.4	Choix des logiciels	36
III.4.1	Présentation du logiciel ETABS :	36
III.4.2	Présentation du logiciel AutoCAD:	37
III.5	Modélisation de la structure avec le logiciel ETABS V20	37
III.5.1	Modélisation géométrique du model :	37
III.5.1.1	Importer un fichier DXF sur ETABS :	37
III.5.2	Définition des cas de charge	39
III.5.2.1	Définition des charges statiques G et Q	39
III.5.2.2	Définition de la charge sismique.	39
III.5.3	Modélisation de la masse sismique	41
III.5.4	Diaphragme	41
III.5.5	Modélisation du voile périphérique :	42
III.5.6	Encastrement de la structure	46
III.5.7	Modélisation de l'effet de température	46
III.6	Résultats et vérification de l'analyse	47
III.6.1	Analyse modale	47
III.6.2	Justification du système de contreventement	49
III.6.3	Période fondamentale	49
III.6.4	Calcul de l'effort tranchant par la méthode modale spectrale :	51
III.6.5	Calcul de l'effort tranchant par la méthode statique équivalente	51
III.6.6	Vérification de l'effort tranchant	52
III.6.7	Vérification des sollicitations normales (effort normal réduit)	52
III.6.8	Vérification des déplacements latéraux inter-étages	54
III.6.9	Justification vis-à-vis de l'effet P- Δ	55
III.7	Conclusion	56
IV.	Ferraillage des Eléments Structuraux	57

IV.1	Introduction	58
IV.2	Conformité à la Règlementation.....	58
IV.2.1	Les poteaux :	58
IV.2.2	Les poutres	59
IV.2.3	Les voiles.....	59
IV.3	Ferraillage des poteaux :.....	61
IV.3.1	Combinaisons de charges	61
IV.3.2	Prescriptions Ferraillage des poteaux.....	61
IV.3.2.1	Armatures longitudinales :	61
IV.3.2.2	Armatures transversales :	62
IV.3.2.3	Calcul des armatures longitudinales	63
IV.3.2.4	Calcul des armatures transversales	65
IV.4	Ferraillage des poutres.....	66
IV.4.1	Combinaisons de charges	66
IV.4.2	Prescriptions Ferraillage des poutres.....	66
IV.4.2.1	Armatures longitudinales.....	66
IV.4.2.2	Armatures transversales.....	67
IV.4.2.3	Calcul des armatures longitudinales	68
IV.4.2.4	Calcul des armatures transversales :.....	69
IV.5	Ferraillage des voiles.....	71
IV.5.1	Combinaisons de charges	71
IV.5.2	Ferraillage.....	71
IV.5.2.1	Ferraillage verticale :.....	71
IV.5.2.2	Ferraillage horizontale.....	73
IV.6	Ferraillage des dalles	75
IV.6.1	Caractéristiques géométriques.....	75
IV.6.2	Combinaisons de charges	75
IV.6.3	Direction de la dalle	76
IV.6.4	Déterminer les moments réels de calcul	76
IV.7	Conclusion.....	78
V.	Création de la Maquette Numérique	79
V.1	Introduction	80
V.2	La maquette numérique	80
V.3	Définition	80
V.4	Différence entre modélisation géométrique et modélisation objet	80
V.5	Présentation logiciel Revit.....	81
V.6	Principe des composants paramétriques de REVIT	81
V.7	Étapes de création de la maquette numérique	82
V.8	Le modèle physique et le modèle analytique :	84
V.9	Limitations du modèle analytique	85

V.10	Correction du modèle analytique.....	86
V.11	Interopérabilité Revit et logiciels EF.....	86
V.11.1	Interopérabilité ETABS REVIT	87
V.11.1.1	Présentation de l'extension CSiXRevit	87
V.11.1.2	Transfert de données ETABS REVIT	87
V.11.2	Interopérabilité REVIT RSA.....	89
V.11.2.1	Présentation du logiciel Robot Structural Analysis.....	89
V.11.2.2	Présentation du lien Revit RSA.....	89
V.11.2.3	Transfert de données.....	90
V.12	Exploitation de la maquette numérique.....	91
V.12.1	Meilleure visualisation :	91
V.12.2	Réalisation des plans de coffrage et de ferrailage :	92
V.12.3	Synchronisation automatique :	93
V.12.4	Les quantitatifs :	94
V.12.5	Maitrise des enjeux environnementaux :	96
V.13	Conclusion.....	99
VI.	INTRODUCTION AU BIM / CIM.....	101
VI.1	Introduction	102
VI.2	Introduction au Building Information Modeling	102
VI.3	Les dimensions du BIM	102
VI.4	Les niveaux du BIM.....	103
VI.4.1	Les différents niveaux LOD	104
VI.5	Le format d'échanges IFC	105
VI.6	Les standards BIM.....	106
VI.6.1	La norme ISO 19650	106
VI.6.2	La norme ISO 16739	106
VI.7	Open BIM et Closed BIM	106
VI.7.1	Open BIM.....	106
VI.7.2	Closed BIM	106
VI.8	Le BIM à l'échelle urbaine.....	107
VI.8.1	Le système d'information géographique (SIG).....	107
VI.8.2	City information modeling (CIM)	108
VI.8.3	Utilité du CIM	108
VI.8.4	BIM SIG et CIM.....	109
VI.9	Conclusion.....	109
VII.	La Mise en Œuvre du BIM.....	110
VII.1	Introduction	111
VII.2	Etapas de mise en œuvre du BIM.....	111
VII.2.1	La question de la motivation	111
VII.2.2	Les objectifs	111

VII.2.3	Le plan.....	112
VII.2.4	Les investissements	112
VII.2.5	Les logiciels.....	112
VII.2.6	Les outils	113
VII.2.7	Le matériel informatique	113
VII.3	Conclusion.....	113
VIII.	CONCLUSION GENERALE	114

LISTES DES SYMBOLES

A : coefficient d'accélération de zone
A_a : section d'armature en appui
A_l : section d'armature longitudinale
A_{min} : section d'armature minimale déterminée par les règlements
A_t : section d'armature de travée ou transversale
B_r : section réduite du béton
C_p : facteur de force horizontale
C_s : coefficient de sécurité
D : coefficient d'amplification dynamique
E : module de déformation longitudinale
E_{ij} : module de déformation longitudinale instantanée
E_{iv} : module de déformation longitudinale différée
G : action permanente
h : hauteur
HA : armature à haute adhérence
I : moment d'inertie
L : longueur
M_t : moment fléchissant en travée
M_a : moment fléchissant en appui
N : effort normal
T : effort tranchant
T_x : période fondamentale dans le sens x-x
T_y : période fondamentale dans le sens y-y
V_t : effort sismique à la base de la structure
W : poids total de la structure
f_c : contrainte caractéristique du béton à la compression
f_e : limite élastique d'acier
f_t : contrainte caractéristique du béton à la traction
S_t : espacement
t : espacement
β : Coefficient sans dimension, coefficient de pondération
ν : Coefficient de poisson
τ : Contrainte tangentielle ou de cisaillement
ψ : Coefficient de pondération
ξ : Pourcentage d'amortissement critique
δ : déplacement
Σ : Sommation
φ : Diamètre d'armature transversale ou treillis soudés
σ_{bc} : contrainte de compression du béton
f_{cj} : résistance caractéristique du béton en compression à j jours

LISTES DES TABLEAUX

Tableau I : Dimensions de la structure.....	19
Tableau II : Charges Permanentes et Surcharges d'exploitations du plancher terrasse.....	31
Tableau III: Charges Permanentes et Surcharges d'exploitations du plancher courant.....	32
Tableau IV : Charges Permanentes et Surcharges d'exploitations du plancher RDC.....	32
Tableau V : Charges Permanentes et Surcharges d'exploitations du plancher SSOL;.....	32
Tableau VI : Coefficient de l'études modal-spectral dans notre cas d'étude.....	40
Tableau VII : Valeurs des pénalités P_q	40
Tableau VIII : Poids sismiques de la structure.....	41
Tableau IX : Résultats essais du cisaillement à la boite de Cassagnarde.....	43
Tableau X : Coupe géologique.....	44
Tableau XI: Vérification de la période fondamentale.....	51
Tableau XII : Vérification de l'effort normal réduit pour les poteaux circulaires.....	53
Tableau XIII : Vérification de l'effort normal réduit pour les poteaux rectangulaires.....	53
Tableau XIV : Vérification des déplacements inter étages selon la direction x-x.....	55
Tableau XV : Vérification des déplacements inter étages selon la direction y-y.....	55
Tableau XVI : Vérification de l'effet $P-\Delta$ dans le sens x-x.....	56
Tableau XVII : Vérification de l'effet $P-\Delta$ dans le sens y-y.....	56
Tableau XVIII : Vérification des conditions de l'RPA sur les poteaux rectangulaires.....	58
Tableau XIX : Vérification des conditions de l'RPA sur les poteaux circulaires.....	58
Tableau XX : Vérification de la première condition pour le dimensionnement des voiles.....	59
Tableau XXI : Vérification de la deuxième condition pour le dimensionnement des voiles.....	60
Tableau XXII : Vérification de condition de rigidité aux extrémités pour le dimensionnement des voiles.....	60
Tableau XXIII : Sollicitations du poteau sous la combinaison $1.35G + 1.5Q$	63
Tableau XXIV : Sollicitations du poteau sous la combinaison $G + Q + E$	63
Tableau XXV : Sections d'armature longitudinales minimale et maximale.....	64
Tableau XXVI : Résultats de calcul des sections des armatures longitudinales.....	64
Tableau XXVII : Résultats de calcul des sections des armatures longitudinales.....	64
Tableau XXVIII : Résultats de calcul des sections des armatures longitudinales.....	64
Tableau XXIX : Diamètres adoptés pour le poteau 40×90	65
Tableau XXX : Vérification de la condition de non fragilité.....	65
Tableau XXXI : Détermination de la section transversale du poteau en zone nodale.....	65
Tableau XXXII : Détermination de la section transversale du poteau en zone courante.....	65
Tableau XXXIII : Vérification au cisaillement.....	66
Tableau XXXIV : Sections d'armature minimale et maximale.....	69
Tableau XXXV : Choix des sections d'armature longitudinale.....	69
Tableau XXXVI : Vérification de la condition de non fragilité.....	69
Tableau XXXVII : Vérification au cisaillement.....	70
Tableau XXXVIII : Dimension de la dalle.....	75
Tableau XXXIX : Combinaison de charges.....	76
Tableau XL : Tableau de BARRES.....	76
Tableau XLI : détermination des moments réels de calcul.....	77
Tableau XLII : résultats de ferrailage à l'ELU.....	77
Tableau XLIII : Matrice d'interférences.....	96
Tableau XLIV : Analyse modale complète.....	116

LISTES DES FIGURES

Figure I-1 Hotel Hyatt Regency Alger	18
Figure I-2 Situation de la zone du projet à partir de la carte topographique	19
Figure I-3 Plan structure SS	20
Figure I-4 Plan structure RDC.....	
Figure I-5 Plan structure N1	20
Figure I-6 Plan structure N2 jusqu'à N6	
Figure I-7 Modèle 3D de la structure	21
Figure II-1 Diagramme parabole-rectangle	26
Figure II-3 Diagramme contraintes-déformations à l'ELS	28
Figure II-4 Diagramme contrainte-déformation caractéristique de l'acier	29
Figure III-2 Conversion des plans à partir d'AutoCAD vers ETABS	38
Figure III-3 Vue 3D du modèle ETABS	38
Figure III-4 Spectre de réponse généré par l'application RPA99	40
Figure III-5 Emplacement du voile périphérique	42
Figure III-6 Plan d'implantation des sondages carottés (SC).....	43
Figure III-7 Charges uniformes et non uniformes sur ETABS	46
Figure III-8 Modélisation effet de température sur ETABS.....	46
Figure III-9 Vue 3D du Mode 01	48
Figure III-10 Vue 3D du mode 02.....	48
Figure III-11 Vue 3D du mode 03.....	48
Figure IV-1 Schéma de ferrailage du poteau 40 x 90.....	66
Figure IV-2 Schéma de ferrailage de la poutre 30 x 55 en zone nodale	70
Figure IV-3 Schéma de ferrailage de la poutre 30 x 55 en zone courante	71
Figure IV-4 Schéma de ferrailage du voile 30 x 120	75
Figure IV-5 Schéma de ferrailage de la dalle d'épaisseur 20cm	78
Figure V-1 Hiérarchie d'objets Revit Autodesk	82
Figure V-2 Objets structure sur Revit Autodesk.	84
Figure V-3 La double représentation d'un poteau sur Revit.....	85
Figure V-4 Discontinuités du modèle analytique.....	85
Figure V-5 Réglage du mur par rapport à un autre mur sur Revit.....	86
Figure V-6 Maquette structure générée à partir du modèle ETABS	87
Figure V-7 Génération des éléments voiles sur Revit	88
Figure V-8 Génération des éléments dalles sur Revit	88
Figure V-9 Génération des éléments poutres sur Revit.....	88
Figure V-10 Génération des éléments poteaux sur Revit	89
Figure V-11 Intégration directe Revit Robot Structural Analysis	90
Figure V-12 Transfert de données entre Revit et Robot Structural Analysis	90
Figure V-13 Ajustement des nœuds sur Revit.....	91
Figure V-14 Vue 3D de la maquette numérique	92
Figure V-15 Quantitatifs poteaux porteurs.....	94
Figure V-16 Quantitatifs Poutres	94
Figure V-17 Quantitatifs Voiles	95
Figure V-18 Quantitatifs dalles	95
Figure V-19 Emissions GES en fonction du secteur industriel.....	97
Figure VI-1 Dimensions BIM	103
Figure VI-2 Modélisation objet poutre avec différents LOD	105
Figure VI-3 Echanges OpenBIM	107
Figure VI-4 Association BIM SIG	108

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'industrie du bâtiment a connu une évolution significative au fil des décennies, passant d'une approche artisanale traditionnelle à une industrie hautement spécialisée et technologiquement avancée.

Cette évolution est due à plusieurs facteurs, notamment :

- L'augmentation de la complexité des bâtiments.
- L'exigence de normes de sécurité et de durabilité plus élevées.
- Le développement de nouvelles technologies.

Le domaine du bâtiment est essentiel à la société. Il contribue à la création de logements, d'infrastructures et d'espaces commerciaux, à la sécurité des occupants, à la durabilité environnementale, à l'efficacité énergétique et au développement économique.

Les professionnels du bâtiment, tels que les architectes, les ingénieurs, les entrepreneurs et les gestionnaires de projet, jouent un rôle important dans la création de bâtiments sûrs, durables et efficaces. En travaillant de concert avec des normes éthiques et des valeurs de responsabilité sociale, ils peuvent contribuer à créer des communautés plus résilientes et un avenir meilleur pour tous.

Dans un secteur où la technologie, les normes de durabilité et les réglementations sont en constante évolution, une formation rigoureuse et à jour est indispensable. Les professionnels du bâtiment doivent disposer d'une solide base de connaissances techniques et de compétences interpersonnelles pour relever les défis variés et dynamiques de ce domaine.

L'objectif principal de ce mémoire de fin d'études est d'établir un lien solide entre les connaissances théoriques acquises en formation académique et les pratiques professionnelles. Cette démarche permet de mieux comprendre comment la théorie peut éclairer la prise de décision dans le monde réel et comment elle peut être mise en œuvre de manière pragmatique pour résoudre des problèmes concrets.

Pour ce faire, le travail est divisé en deux parties. La première partie porte sur l'analyse de la superstructure d'un ouvrage. La seconde partie traite de la création et de l'exploitation d'une maquette numérique.

La première partie, consacrée à l'analyse de la superstructure, comprend les trois premiers chapitres :

- Le premier chapitre établit les hypothèses de calcul en se fondant sur les caractéristiques des matériaux.
- Le deuxième chapitre analyse dynamiquement l'ouvrage.
- Le troisième chapitre étudie le ferrailage des éléments de la superstructure.

La deuxième partie, axée sur la création et l'exploitation d'une maquette numérique, comprend les trois derniers chapitres :

- Le quatrième chapitre décrit les processus de modélisation de la maquette numérique.
- Le cinquième chapitre présente les concepts fondamentaux du BIM (Building Information Modeling) et du CIM (City Information Modeling).

- Le sixième chapitre décrit la méthodologie pour élaborer et mettre en œuvre un processus BIM au sein d'une entreprise.

I. Description de l'ouvrage

I.1 Introduction

Dans le cadre de notre analyse de la superstructure de l'ouvrage qui constitue le bloc principal de l'hôtel Hyatt Regency Alger, nous entamons ce chapitre en procédant à la description de cet édifice, caractérisé par une configuration de six étages en élévation et deux niveaux en sous-sol.

I.2 Présentation générale du projet

L'hôtel Hyatt Regency Alger (Figure I-1), situé dans la ville d'Alger, se compose de 08 blocs au total. Cependant, notre étude se concentre spécifiquement sur le bloc principal désigné sous le nom de « BLOC B ». Ce bloc est au cœur du projet, et c'est lui que nous analyserons pour garantir sa conformité aux règles de construction parasismiques.



Figure I-2 Hotel Hyatt Regency Alger

I.3 Règlements en vigueur

L'étude a été menée en utilisant les codes de calcul suivants :

- **CBA 93** : Règles de conception et de calcul des structures en béton armé.
- **DTR B C 2.48** : Règles parasismiques algériennes RPA 99 Version 2003.
- **DTR B C.2.2** : Charges permanentes et charges d'exploitation.
- **DTR B C 2.42** : Règles de conception et calcul des parois et murs en béton banché.

I.4 Aperçu général du site

I.4.1 Situation géographique

Le site, objet de la présente étude se trouve au niveau de la Commune de Dar el Beida, Wilaya d'Alger (Figure I-3). L'assiette, est choisie pour recevoir un hôtel de 6 niveaux

(RDC+6+02 sous-sol). La zone est classée selon le RPA 99/version 2003 comme zone de forte sismicité (zone III).

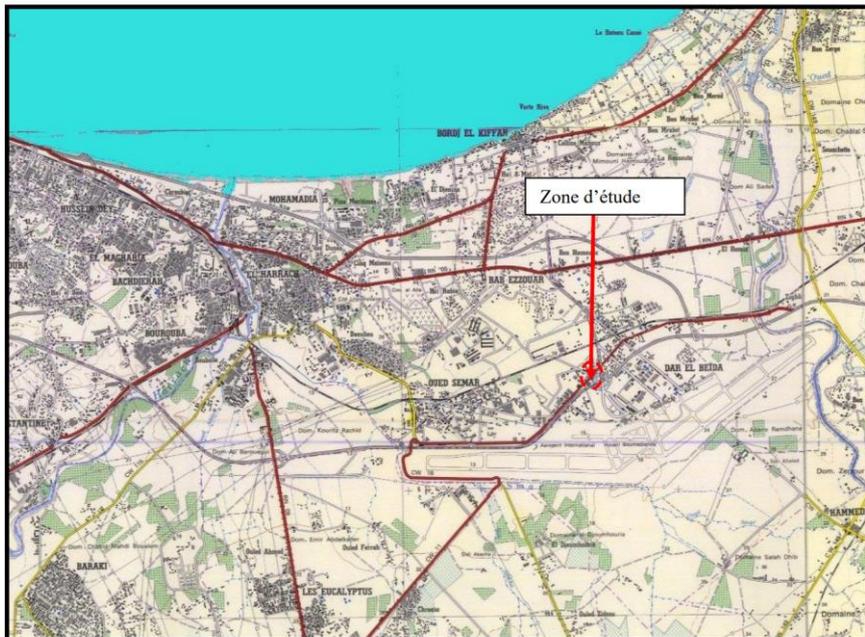


Figure I-4 Situation de la zone du projet à partir de la carte topographique

I.4.2 Caractéristiques géométriques

Tableau I-I : Dimensions de la structure.

	Dimensions	En élévation (m)
En plan	Longueur totale	63
	Largeur totale	53
En élévation	Hauteur Sous -sol 02	3,3
	Hauteur Sous -sol 01	4,22
	Hauteur du RDC	5,44
	Hauteur étage courant	3,91
	Hauteur totale	28,80

I.4.1 Plans Structure

Les plans présentés ci-après (Figure I-5 - I-6) représentent les plans structure du bloc B de l'hôtel Hyatt Regency Alger.

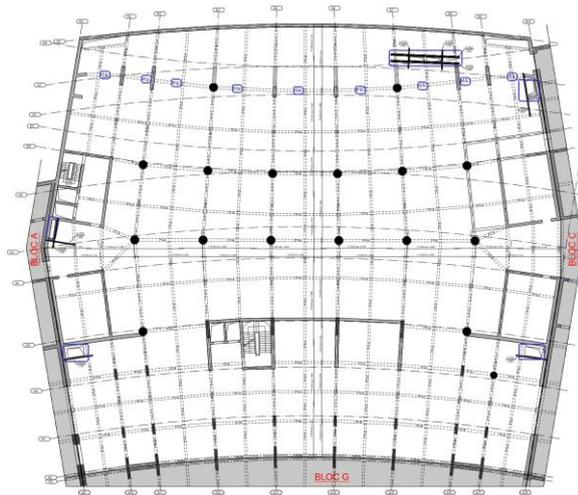


Figure I-7 Plan structure SS

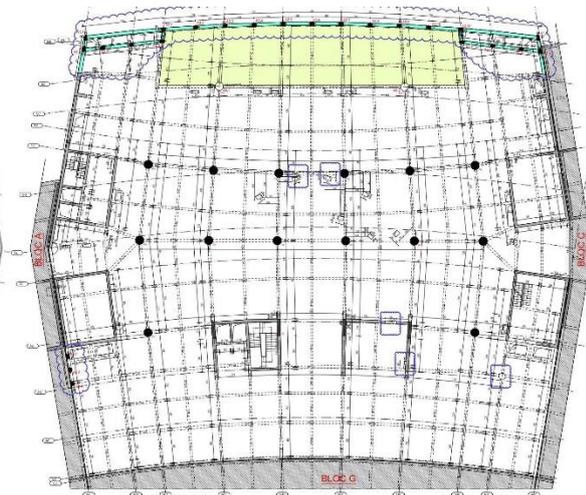


Figure I-4 Plan structure RDC

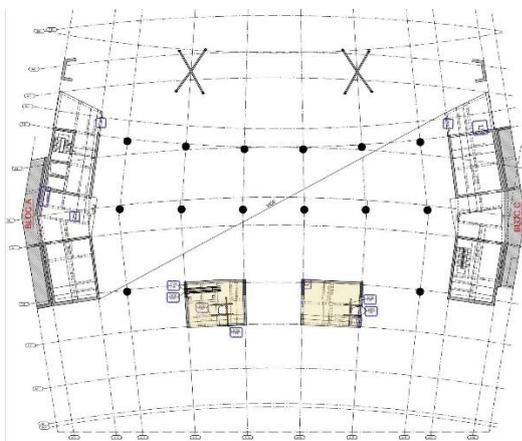


Figure I-5 Plan structure N1

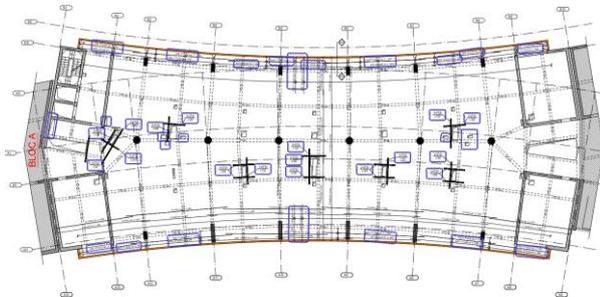


Figure I-6 Plan structure N2 jusqu'au N6

I.4.2 Ossature et système constructif adopté

- **Ossature :**

L'ossature de cet ouvrage est constituée d'un système des portiques et des voiles.

- **Planchers :**

Pour ce bâtiment, le choix s'est porté sur des dalles pleines.

- **Maçonnerie :**

La maçonnerie de l'hôtel est réalisée en briques creuses :

- Murs extérieurs constitués d'une double paroi en briques (15cm et 10cm d'épaisseur) séparée par une lame d'air de 5cm d'épaisseur.
- Murs intérieurs constitués par une seule paroi de brique de 10cm d'épaisseur.

- **Escaliers :**

Les escaliers utilisés dans ce bâtiment sont des escaliers à deux volées avec un paliers de repos.

- **Cage d'ascenseurs :**
 - La structure comporte une cage d'ascenseur : du sous-sol 02 jusqu'à 6^{ème} étage.
- **Système structural :**

Le Bloc B est composé de trois types d'étages (Figure I-8) :

- Le premier type inclut les deux niveaux en sous-sol ainsi que le rez-de-chaussée.
- Le deuxième type est représenté par le premier étage.
- Le troisième type comprend le deuxième jusqu'au sixième étage, ainsi que la terrasse.

Le dispositif de renforcement de cette structure est constitué de voiles en béton armé. Il est assumé que la stabilité est principalement assurée par les voiles porteurs. Ainsi, conformément à l'article 3.4 des normes RPA99/2003, les voiles porteurs supportent plus de 20% des contraintes engendrées par les charges verticales. De plus, les forces horizontales sont exclusivement reprises par ces voiles.

→ Cette condition sera soumise à une vérification ultérieure.

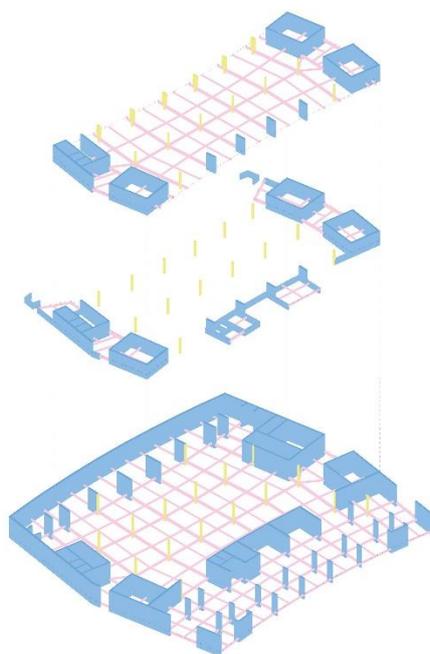


Figure I-9 Modèle 3D des niveaux de la structure

I.5 Caractéristiques géotechniques du sol

En se référant au extrait du rapport géotechnique inclus en annexe B, les informations suivantes peuvent être extraites :

- L'ouvrage est implanté dans un site meuble catégorie S3 selon le règlement parasismique Algérien RPA99/VERSION 2003, en se référant à la vitesse de l'onde de cisaillement comprise entre $200 \leq V_s \leq 400$ m/s, à partir de dix (10m) de profondeur.
- La contrainte admissible du sol : $\sigma_a = 0,224$ MPa.

I.6 Fondations

Suite à l'expertise, le laboratoire géotechnique propose :

- Fondations superficielles de type radier général.
- L'ancrage minimal des fondations : D= 08m

I.7 Conclusion :

Les caractéristiques de l'ouvrage ont été établies. Nous procéderons par la suite à une analyse en utilisant les données et informations préalablement rassemblées.

II. Caractéristiques des Matériaux

II.1 Introduction

Le béton armé est un matériau composite constitué de béton et de barres d'acier alliant les propriétés mécaniques complémentaires de ces matériaux. Il est utilisé comme matériau de construction, en particulier pour le bâtiment et le génie civil. La composition des deux matériaux permet au béton armé d'être à la fois résistant à la compression ainsi qu'à la traction.

II.2 Béton

On appelle béton un matériau constitué par le mélange, dans des proportions convenables, de ciment, de granulats (sables et graviers) et d'eau, et éventuellement de produits d'addition (adjuvants). Parmi ces caractéristiques on cite la résistance mécanique, l'isolation acoustique et thermique, la résistance au feu, la durabilité et l'adaptabilité

Il est important de noter que les caractéristiques du béton peuvent varier en fonction des types des adjuvants et des techniques de fabrication utilisées. Les mélanges de béton peuvent être ajustés pour répondre aux besoins spécifiques d'un projet de construction particulier.

II.2.1 Résistances mécaniques du béton

II.2.1.1 Résistance caractéristique du béton à la compression

Le béton est défini du point de vue mécanique par sa résistance à la compression. Lorsque des sollicitations s'exercent sur un béton en cours d'exécution, on se réfère à la résistance caractéristique f_{cj} obtenue au jour considéré à partir de f_{c28} (l'âge de la maturité).

Pour $j \leq 28$:

$$\begin{cases} f_{cj} = \frac{j}{4.76+0.83j} f_{c28} & \text{si } j < 60 \text{ jours} \\ f_{cj} = 1.1 f_{c28} & \text{si } j \geq 60 \text{ jours} \end{cases} \quad \text{pour } f_{c28} \leq 40 \text{ MPa}$$

Pour $28 \leq j \leq 60$

$$\begin{cases} f_{cj} = \frac{j}{1.40+0.95j} f_{c28} & \text{si } j < 28 \text{ jours} \\ f_{cj} = f_{c28} & \text{si } j \geq 28 \text{ jours} \end{cases} \quad \text{pour } f_{c28} > 40 \text{ MPa:}$$

Pour $j \geq 60$:

$$f_{cj} = 1,1 f_{c28}$$

Pour le cas de notre étude : $f_{c28} = 30\text{MPa}$.

II.2.2 Résistance caractéristique à la traction

La résistance caractéristique à la traction du béton à j jours, notée f_{tj} , est déduite conventionnellement de celle à la compression par la relation :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 \quad \text{Pour} \quad f_{cj} \leq 60\text{MPa}$$

$$f_{tj} = 0,275 f_{cj}^{2/3} \quad \text{Pour} \quad f_{cj} \geq 60 \text{MPa}$$

Pour le cas de notre étude : $f_{t28} = 2,4 \text{MPa}$.

II.2.3 Déformation longitudinale du béton :

Lorsque l'on applique une charge permanente à une structure en béton, elle subit deux types de déformation longitudinale :

- **Les déformations sous charge instantanée** : Pour les calculs sous chargement instantané d'une durée d'application inférieure à 24 heures, on utilise le module de déformation instantanée E_{ij} :

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}}$$

- **Les déformations sous charge de longue durée (le fluage)** :

Pour un chargement de longue durée d'application ($f_{c28} \leq 60 \text{MPa}$) et qui prend en compte la déformation finale du béton (déformation instantanée augmentée du fluage) on utilise la formule suivante :

$$E_{vj} = 3700 \sqrt[3]{f_{cj}}$$

Pour le cas de notre étude :

Module de déformation longitudinale instantanée

$$E_{i28} = 34179,56 \text{MPa}$$

Module de déformation longitudinale différée

$$E_{v28} = 11496,76 \text{MPa}$$

II.2.4 Déformation transversale du béton :

En compression comme en traction, la déformation longitudinale est aussi accompagnée d'une déformation transversale.

Le coefficient de Poisson est le rapport entre les déformations unitaires transversales et longitudinales, quand la déformation a lieu dans les limites d'élasticité.

$$\nu = \frac{\text{déformation transversale}}{\text{déformation longitudinale}}$$

Avec :

$\nu = 0$ Béton fissuré à L'E.L.U.

$\nu = 0,2$ Béton non fissuré à L'E.L.S.

II.2.5 Etats Limites

Tous les calculs et toutes les vérifications doivent se baser sur la notion des états limites.

On distingue deux types d'états limites :

II.2.5.1 Les états limites ultimes (E.L.U)

Il correspond à la limite :

- De l'équilibre statique : stabilité des constructions (non glissement, non renversement).

- De la résistance de l'un des matériaux (béton et l'acier) : capacité portante qui dépend des matériaux constitutifs (non rupture par écrasement ou par allongement excessif).
- De la stabilité de forme (flambement) : les pièces élancées soumises à des efforts de compression subissent des déformations importantes et deviennent instables.

Pour ce qui est des contraintes limite à l'ELU nous citons :

- **Contrainte de calcul en compression :**

Le comportement réel du béton est modélisé par la loi parabole-rectangle sur un diagramme contraintes déformations donné sur la figure suivante (Figure II-1) :

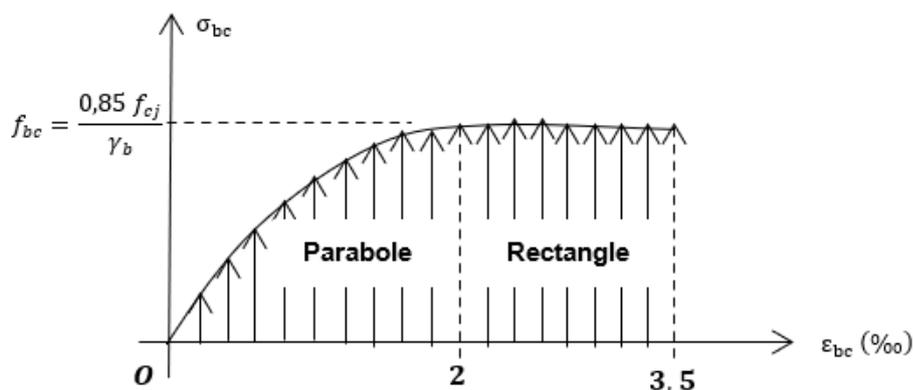


Figure II-2 Diagramme parabole-rectangle

σ_{bc} = contrainte de compression du béton.

f_{cj} = résistance caractéristique du béton en compression à j jours ;

f_{bc} = contrainte de calcul pour $2‰ \leq \varepsilon_{bc} \leq 3,5‰$

γ_b = coefficient de sécurité.

ε_{bc} = déformation du béton en compression.

La formule suivante est utilisée pour le calcul de contrainte en fonction de la déformation :
Pour $2‰ \leq \varepsilon_{bc} < 3‰$

$$\sigma_{bc} = \frac{0,85 \cdot f_{cj}}{\gamma_b}$$

Le coefficient de sécurité partiel γ_b tient compte d'éventuels défauts localisés ainsi que la réduction possible de la résistance du matériau mis en œuvre par rapport à sa résistance caractéristique définie à priori :

$\gamma_b = 1.5$ pour les combinaisons fondamentales.

$\gamma_b = 1.15$ pour les combinaisons accidentelles.

Le coefficient θ est fixé en fonction de la durée d'application des charges :

$\theta = 1$ si la durée est supérieure à 24h.

$\theta = 0.9$ si la durée est comprise entre 1h et 24h.

$\theta = 0.85$ sinon.

Pour le cas de notre étude :

- Situations courantes : $f_{bu} = 17 \text{ MPa}$.
- Situations accidentelles : $f_{bu} = 22,17 \text{ MPa}$.

- Contrainte de calcul au cisaillement :

La contrainte ultime de cisaillement est limitée par : $\tau \leq \bar{\tau}_u$

- Fissuration peu nuisible : $\bar{\tau}_u = \min\left(\frac{0,20 f_{cj}}{\gamma_b}; 5 \text{ MPa}\right)$.
- Fissuration préjudiciable ou très-préjudiciable : $\bar{\tau}_u = \min\left(\frac{0,15 f_{cj}}{\gamma_b}; 4 \text{ MPa}\right)$.

Pour le cas de notre étude :

Situations courantes :

- Fissuration peu préjudiciable $\bar{\tau}_u = 4 \text{ MPa}$.
- Fissuration préjudiciable ou très-préjudiciable $\bar{\tau}_u = 3 \text{ MPa}$.

Situations accidentelles :

- Fissuration peu préjudiciable $\bar{\tau}_u = 5 \text{ MPa}$.
- Fissuration préjudiciable ou très-préjudiciable $\bar{\tau}_u = 3,91 \text{ MPa}$.

II.2.5.2 Les états limites de services (E.L.S)

Il correspond à la limite :

- De compression de béton : : contrainte de compression bornée par le règlement BAEL.
- D'ouverture des fissures : durabilité des ouvrages (exemple :non corrosion des aciers).
- Des déformations : il consiste à vérifier que les déformations sont inférieures à des déformations limites.
- **Contrainte de calcul en compression :**

Dans le cas de l'ELS on suppose que le diagramme parabole rectangle (Figure II-3) reste dans le domaine élastique linéaire, est défini par son module d'élasticité :

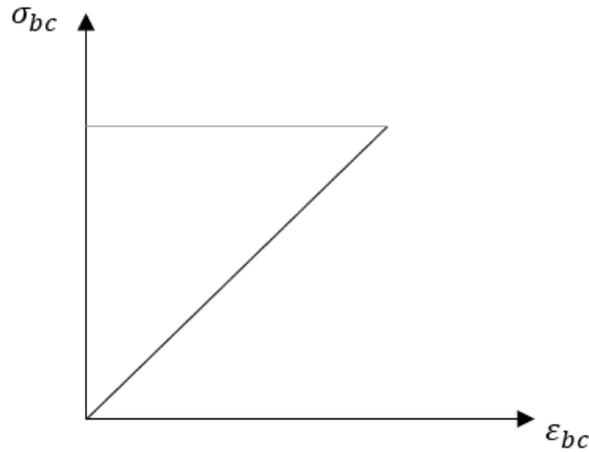


Figure II-3 Diagramme contraintes-déformations à l'ELS

II.3 Acier

L'acier se définit comme un alliage composé principalement de fer et de carbone. On peut le catégoriser en différentes variétés en fonction de sa teneur en carbone. On distingue ainsi les aciers doux, ayant une teneur en carbone de l'ordre de 0,15 à 0,25 %, et les aciers mi-durs et durs, caractérisés par une teneur en carbone plus élevée, comprise entre 0,25 et 0,45 %.

II.3.1 Types d'aciers

Sur le marché, on distingue plusieurs types d'acier, dont :

- **Acier rond lisse :**

Forme de barre, en principe et une section circulaire et une surface lisse. Les ronds lisses sont utilisés en deux nuances (catégories) :

$$F_e E215 \rightarrow f_e = 215 \text{ MPa.}$$

$$F_e E235 \rightarrow f_e = 235 \text{ MPa.}$$

- **Acier haute adhérence :**

Les barres à haute adhérence ont une section sensiblement circulaire qui présente des nervures pour améliorer l'adhérence entre l'acier et le béton. Les hautes adhérences se divisent en deux nuances :

$$F_e E400 \rightarrow F_e = 400 \text{ MPa.}$$

$$F_e E500 \rightarrow F_e = 500 \text{ MPa.}$$

- **Treillis soudés :**

Certains éléments en B.A tels que les dalles, les murs voile sont armés suivant deux directions perpendiculaires.

On utilise pour cela les treillis soudés qui sont constitués par des fils se croisant et qui seront soudés aux points du croisement.

II.3.2 Caractéristiques mécaniques de l'acier

L'acier possède certaines propriétés qui le définissent distinctement, notamment :

- **Limite d'élasticité F_e :**

La limite d'élasticité est la contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible. Désignée f_e (unité en MPa).

- **Module d'élasticité longitudinale :**

Le module de déformation longitudinale de l'acier E_s est de l'ordre de 200 000 MPa.

Pour le cas de notre étude : $E_s = 200000$ MPa.

II.3.3 Etats Limites

Les contraintes correspondant aux deux états limites sont également établies en accord avec les principes énoncés précédemment.

II.3.3.1 Les états limites ultimes (E.L.U)

Les conditions de compression pour l'état limite ultime (E.L.U) en ce qui concerne l'acier sont définies de la manière suivante (Figure II-4):

$$f_{su} = f_e / \gamma_s$$

γ_s : Coefficient de sécurité.

$\gamma_s = 1,15$ dans le cas général.

$\gamma_s := 1$ dans le cas accidentel.

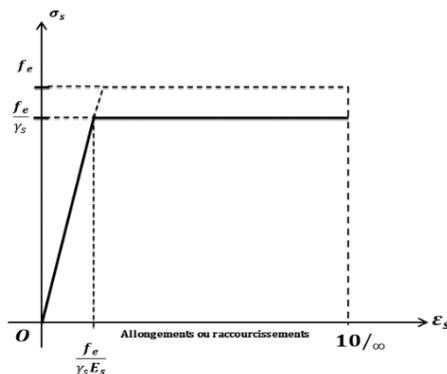


Figure II-5 Diagramme contrainte-déformation caractéristique de l'acier

Pour le cas de notre étude :

Situations courantes : $f_{su} = 434,78$ MPa.

Situations accidentelles : $f_{su} = 500$ MPa.

II.3.3.2 Etat Limite Service (ELS)

Les conditions de compression pour l'état limite ultime (E.L.S) en ce qui concerne l'acier sont définies de la manière suivante :

- Fissuration peu préjudiciable : limitation à f_e (aucune vérification)
- Fissuration préjudiciable : $\sigma_{st} \leq \min\left(\frac{2}{3}Fe; 110\sqrt{n \cdot f_{t28}}\right)$
- Fissuration très préjudiciable : $\sigma_{st} \leq \min\left(\frac{1}{2}Fe; 90\sqrt{n \cdot f_{t28}}\right)$

$$\begin{cases} \eta = 1 & \text{Pour les ronds lisses} \\ \eta = 1,6 & \text{Pour les acier HA (d} \geq 6 \text{ mm)} \\ \eta = 1,3 & \text{Pour les aciers HA} \end{cases}$$

η : Coefficient de fissuration.

II.4 Actions et sollicitations

II.4.1 Actions :

Pour l'application on distingue :

- **Actions permanêtes « G »** : L'action permanente se caractérise par une intensité constante ou peu variable dans le temps.
- **Actions variables « Q »** : L'intensité des actions variables présente fréquemment et de manière importante des variations dans le temps.
- **Actions accidentelles « FA »** : Les actions accidentelles, issues de phénomènes.

II.4.2 Sollicitations

Les sollicitations sont les efforts (effort normal, effort tranchant) et les moments (moment de flexion, moment de torsion) calculés à partir des combinaisons d'actions appliquées à la structure. D'une façon générale, les sollicitations sont calculées en utilisant pour la structure un modèle élastique et linéaire, en employant les procédés de la Résistance des Matériaux «RDM».

II.4.2.1 Sollicitations de calcul vis-à-vis des états limites ultimes de résistance :

Dans la littérature, on distingue les combinaisons d'actions suivantes :

- **Combinaisons fondamentales :**

Les combinaisons fondamentales s'écrivent selon la forme suivante :

$$1,35 \cdot G_{max} + G_{min} + \gamma_{Q1} \cdot Q_1 + \sum_{(m)}^n 1,3\gamma_{Qi} \cdot Q_i$$

$\gamma_{Qi} = 1,5$ dans le cas général.

$\gamma_{Qi} = 1,35$ dans les autres cas.

- **Combinaisons accidentelles :**

Les combinaisons accidentelles s'écrivent selon la forme suivante :

$$G_{max} + G_{min} + \gamma_{Q1} \cdot Q_1 + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \cdot Q_i + F_A$$

II.4.2.2 Sollicitations de calcul vis-à-vis des états limites de service

La combinaison d'actions s'écrit selon la forme suivante :

$$G_{max} + G_{min} + Q_1 + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \cdot Q_i$$

γ_{Qi} : coefficient multiplicateur.

II.5 Hypothèses de calcul

Nous allons procéder à la détermination des hypothèses de calcul :

II.5.1 Evaluation des charges et des surcharges

Les charges réglementaires sont :

- Les charges permanentes qui présentent le poids.
- Les charges d'exploitation ou surcharges.

Celles-ci sont présentées dans le DTR B.C.2.2 des charges permanentes et d'exploitations.

Tableau II-I : Charges Permanentes et Surcharges d'exploitations du plancher terrasse.

Type de charge	Valeurs de la charge en (KN/m ²)
Charges Permanentes	
G-Dalles pleines en béton armé ép.18cm	4.50
G-Permanent en portée	
Carrelage et isolation acoustique	0.50
Chape béton	0.80
Faux Plafond et installation techniques	1.70
Parois divisaires	2. 00
Total des charges permanentes	9.50
Charges d'exploitation	
Q-Exploitation Neige	1.00
Total des charges d'exploitation	1.00

Tableau II-II: Charges Permanentes et Surcharges d'exploitations du plancher courant.

Type de charge	Valeurs de la charge en (KN/m ²)
Charges Permanentes	
G-Dalles pleines en béton armé ép.18cm	4.50
G-Permanent en portée	
Carrelage et isolation acoustique	0.50
Chape béton	0.80
Faux Plafond et installation techniques	0.70
Parois divisoires	1. 00
Total des charges permanentes	7.50
Charges d'exploitation	
Q-Exploitation hébergement hôtel	2.00
Total des charges d'exploitation	2.00

Tableau II-III : Charges Permanentes et Surcharges d'exploitations du plancher RDC.

Type de charge	Valeurs de la charge en (KN/m ²)
Charges Permanentes	
G-Dalles pleines en béton armé ép.20cm	5.00
G-Permanent en portée	
Carrelage et isolation acoustique	0.80
Chape béton	1.20
Installation technique	0.50
Parois divisoires	1. 00
Total des charges permanentes	8.50
Charges d'exploitation	
Q-Exploitation restaurants, cafés, bureaux	3.50
Total des charges d'exploitation	3.50

Tableau II-IV : Charges Permanentes et Surcharges d'exploitations du plancher SSOL.;

Type de charge	Valeurs de la charge en (KN/m ²)
Charges Permanentes	
G-Dalles pleines en béton armé ép.20cm	5.00
G-Permanent en portée	
Chape béton	2.00
Installation technique	0.50
Total des charges permanentes	7.50
Charges d'exploitation	
Q-Exploitation parking -véhicules léger	2.50
Total des charges d'exploitation	2.50

II.5.2 Résumé des caractéristiques des matériaux

• Béton

Résistances caractéristiques :

- Résistance caractéristique du béton à la compression : $f_{c28} = 30\text{MPa}$.
- Résistance caractéristique du béton à la traction : $f_{t28} = 2,4\text{MPa}$.

Contrainte limite de compression ELU :

- Situations courantes : $f_{bu} = 17\text{MPa}$.
- Situations accidentelles : $f_{bu} = 22,17\text{MPa}$.

Contrainte limite de cisaillement ELU :

- Situations courantes :
- Fissuration peu préjudiciable $\bar{\tau}_u = 4\text{MPa}$.
 - Fissuration préjudiciable ou très-préjudiciable $\bar{\tau}_u = 3\text{MPa}$.
- Situations accidentelles :
- Fissuration peu préjudiciable $\bar{\tau}_u = 5\text{MPa}$.
 - Fissuration préjudiciable ou très-préjudiciable $\bar{\tau}_u = 3,91\text{MPa}$.

Modules de déformations :

Module de déformation longitudinale instantanée $E_{i28} = 34179,56\text{MPa}$.
Module de déformation longitudinale différée $E_{v28} = 11496,76\text{MPa}$.

• Acier

Contrainte limite ELU :

Situations courantes : $f_{su} = 434,78\text{MPa}$.
Situations accidentelles : $f_{su} = 500\text{MPa}$.

Module d'élasticité : $E_s = 200000\text{MPa}$.

II.6 Effet de la température

Le règlement CBA 93 exige que pour toute structure ayant des éléments structuraux supérieurs à 25m dans les régions sèches et à forte exposition de température doivent être vérifiés par une étude thermique.

Etant donné que la dimension en plan du bâtiment étudié est supérieure à 25 m, il est impératif de faire une étude thermique, en plus des contraintes produites par les chargements verticaux et horizontaux, notre structure sera sollicitée par des contraintes thermiques.

La variation de la température à une influence sur la vie de la structure suivant les changements saisonniers, une augmentation sensible de la température provoque une dilatation des éléments structuraux d'un ouvrage, de même une chute de la température provoque un raccourcissement de ces derniers.

Etant donné que la température à l'intérieur des bâtiments est uniforme, c'est donc principalement les éléments situés à l'extérieur qui seront les plus concernés par l'étude de l'effet de température.

II.6.1 Coefficient de dilatation thermique

- Le coefficient de dilatation thermique du béton est de l'ordre de $7 \text{ à } 12 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ et celui de l'acier qui est de l'ordre de $10^{-5} \text{ [K}^{-1}\text{]}$.

II.6.2 Contraintes thermiques

La dilatation ou le raccourcissement des éléments porteurs (poteaux, poutres, voiles), dus aux variations de la température fait apparaître des contraintes dans ces éléments. Si on considère une poutre soumise à des températures de T_0 à T , des contraintes de traction ou de compression apparaissent dans la poutre. Sous l'effet de la variation de la température,

La contrainte est évaluée par la loi de HOOKE qui est valable que dans le domaine élastique, son expression est :

$$\sigma = E \times \alpha \times \Delta t$$

Avec :

σ : contrainte thermique .

E : module de YOUNG .

α : coefficient de dilatation thermique .

Δt : variation de la température .

II.6.3 Convention de signes

La contrainte thermique produite par une variation de la température se traduit par une contrainte de traction ou de compression et cela en fonction de l'augmentation ou de la diminution de la température.

$\Delta t > 0 \Rightarrow \sigma > 0 \dots \dots \dots$ Allongement, traction .

$\Delta t < 0 \Rightarrow \sigma < 0 \dots \dots \dots$ Rétrécissement, compression.

II.6.4 Procédure de calcul

Afin de quantifier les induits par la température dans les différents éléments de la structure de l'extrémité, les plus exposées à la variation de température, un calcul à la température a été conduit selon l'article A.3 du CBA 93, en Algérie du Nord (climat tempéré) : 35° C et -15° C .

Sous les combinaisons de charge :

- à l'ELU : $1.35G + 1.5Q + 0.8T$
- à l'ELS : $G + Q + 0.6T$

NB : Les différentes sollicitations qui seront utilisées pour le ferrailage sont tirées de l'analyse statique et sismique et thermique de la structure réalisée par le logiciel ETABS V 20.

II.7 Conclusion

Nous avons examiné quelques concepts fondamentaux du béton armé, qui nous ont permis d'établir les hypothèses de calcul. Ces résultats seront le fondement sur lequel reposera l'ensemble de nos calculs et analyses ultérieures.

III. Calcul Dynamique

III.1 Introduction

Dans le cadre de ce chapitre, nous entreprendrons une étude du calcul dynamique, en mettant particulièrement en lumière l'analyse sismique. Cette approche spécifique découle de la localisation de notre projet dans la wilaya d'Alger, une zone caractérisée par une importante activité sismique.

III.2 Classification de l'ouvrage

Les règles parasismiques algériennes préconisent un ensemble de classifications nécessaires à la définition de la situation sismique étudiée et au choix de la méthode et des paramètres de calcul des forces sismiques. D'après les critères du chapitre III du règlement RPA 99 / Version 2003, l'ouvrage étudié est classé comme suit :

- L'ouvrage est implanté dans la wilaya d'Alger donc en zone III.
- L'ouvrage abrite fréquemment de grands rassemblements et pouvant accueillir simultanément plus de 300 personnes, il est donc classé dans le Groupe 1B.
- Selon le rapport géotechnique relatif à notre ouvrage, on est en présence d'un site meuble de catégorie S3.
- Notre structure est contreventée par des voiles porteurs en béton armé.
- Le bâtiment se particularise par sa forme irrégulière en plan et en élévation.

III.3 Choix de la méthode de calcul

Le calcul des forces sismiques peut être réalisé en suivant l'une des trois méthodes définies par le règlement parasismique algérien RPA 99 / Version 2003 :

- La méthode statique équivalente.
- La méthode d'analyse modale spectrale.
- La méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes.

Dans le cadre de cette étude, la méthode d'analyse modale spectrale a été choisie pour le bâtiment considéré. Cette décision découle de sa capacité à être appliquée à n'importe quel type de structure, indépendamment de toute contrainte de régularité en plan ou en élévation contrairement à la méthode statique équivalente.

III.4 Choix des logiciels

III.4.1 Présentation du logiciel ETABS :

Dans le cadre de notre étude, nous avons opté pour l'utilisation du logiciel ETABS. ETABS est un logiciel d'ingénierie destiné à l'analyse et à la conception de bâtiments. Les outils de modélisation et les modèles, les prescriptions de charges basées sur les codes, les méthodes d'analyse et les techniques de solution, tous coordonnés avec la géométrie en grille. Des systèmes de base ou avancés sous des conditions statiques ou dynamiques peuvent être évalués à l'aide d'ETABS.

III.4.2 Présentation du logiciel AutoCAD:

AutoCAD, est un logiciel de dessin et conception assistée par ordinateur (CAO), ce logiciel offre la possibilité d'effectuer la conception de divers éléments et objets en 2D et en 3D. Avec des fonctionnalités étendues adaptées aux besoins des architectes, ingénieurs et professionnels de la construction, leur permettant de concevoir des dessins précis et détaillés.

III.5 Modélisation de la structure avec le logiciel ETABS V20

La modélisation de la structure sur le logiciel ETABS est expliquée dans les paragraphes qui vont suivre.

III.5.1 Modélisation géométrique du model :

Pour débiter la modélisation, nous avons procédé à la sélection d'unités de mesure adaptées à notre projet. Ensuite, nous avons créé la géométrie fondamentale de notre modèle suivant ces étapes :

- La définition des lignes de construction.
- La définition des sections des éléments qui constituent la structure.
- La représentation et le dessin de la structure graphiquement par les éléments définis :
 - Les poteaux et les poutres sont modélisés par un élément de type FRAME.
 - Les voiles et dalles par un élément de type SHELL.

Pour la modélisation sur ETABS, nous avons utilisé l'option d'importation DXF afin d'intégrer de manière précise les plans provenant d'AutoCAD.

III.5.1.1 Importer un fichier DXF sur ETABS :

ETABS permet une modélisation rapide de modèles complexes en important des fichiers DXF AutoCAD existants (Figure III-1). Cependant, ETABS ne traite que des arcs, des lignes et des polygones fermés à partir d'un fichier DXF.

Nous avons suivi les étapes suivantes :

-Création différents calques pour les dalles, poutres et poteaux et voiles dans un nouveau dessin AutoCAD. Nous avons utilisé directement quelques calques existants, avec suppression des calques inutiles.

-S'assurer de déplacer l'origine du modèle AutoCAD à (0,0,0)
-Enregistrement en tant que fichier DXF.

- Importation du fichier DXF sur ETABS. (Pendant le processus d'importation, on sélectionne les calques à utiliser sur ETABS).
- ETABS permet d'activer et de désactiver les calques pour choisir facilement les calques souhaités.
- Le clic avec le bouton droit sur un élément permet de convertir une zone en un objet structural ETABS.

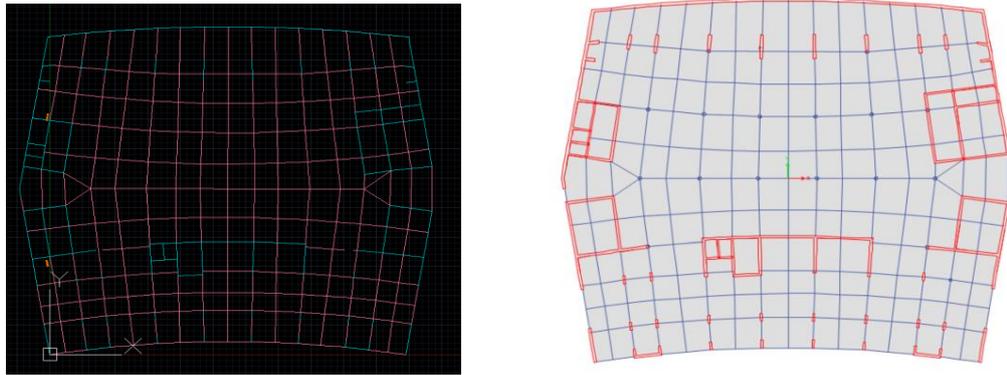


Figure III-2 Conversion des plans à partir d'AutoCAD vers ETABS

Les étages peuvent être devisés en groupes ayant une géométrie de plancher similaire. Après modélisation des étages types dans ETABS il est possible de dupliquer l'étage ou des éléments d'un étage.

L'option d'importation des plans au format DXF d'AutoCAD vers ETABS peut être réalisée en tant que fond de plan ou alternativement, les plans DXF peuvent être convertis directement en éléments structuraux, facilitant ainsi le processus de modélisation (Figure III-3). Cependant, il est impératif d'être vigilant lors de cette conversion. Des erreurs peuvent survenir, en particulier au niveau des nœuds, et nécessitent une vérification afin d'éviter tout problème ultérieur lors du maillage du modèle.

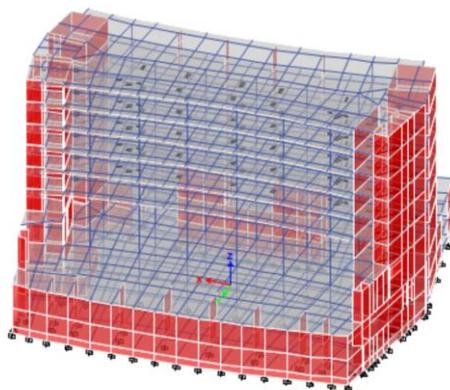


Figure III-4 Vue 3D du modèle ETABS

III.5.2 Définition des cas de charge

III.5.2.1 Définition des charges statiques G et Q

Lors de la modélisation des composants de la structure tels que les poteaux et les poutres, les voiles, le logiciel intègre la charge provenant de leur propre poids. Ensuite, nous incorporons les charges (G et Q) provenant des planchers, des murs et des acrotères. Les valeurs utilisées pour estimer les charges permanentes et les surcharges d'exploitation sont exposées dans le chapitre II.

III.5.2.2 Définition de la charge sismique.

Conformément à l'article 4.3.3 du RPA 99/Version 2003, un spectre de calcul est mis à disposition pour évaluer les forces sismiques associées à chaque mode de vibration. Ces forces sont ensuite combinées pour obtenir la réponse globale de la structure. Les quatre équations mathématiques régissant ce spectre de calcul sont dépendantes de multiples paramètres :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1,25A(1 + \frac{T}{T_1} 2,5\eta \frac{Q}{R} - 1)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 1,25A(2,5\eta) \left(\frac{Q}{R}\right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 1,25A(2,5\eta) \left(\frac{Q}{R}\right) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{\frac{2}{3}} & 0 \leq T \leq 3sec \\ 1,25A(2,5\eta) \left(\frac{Q}{R}\right) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{3}{T}\right)^{\frac{5}{3}} & T \geq 3sec \end{cases}$$

Avec :

A : coefficient d'accélération de zone.

η : Facteur de correction d'amortissement.

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

ξ : Pourcentage d'amortissement critique.

R : coefficient de comportement de la structure.

T₁, T₂ : Périodes caractéristiques associés a la catégorie de site.

Q : facteur de qualité.

$$Q=1+ \sum P_q$$

P_q : facteur des pénalités.

Voici un récapitulatif des coefficients obtenus pour notre cas d'étude, présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-I : Coefficient de l'études modal-spectral dans notre cas d'étude.

	Valeur	Justification
A	0,3	Groupe d'usage 1B, zone III.
R	3,5	Voile en béton armé
Q_x	1,2	Voir tableau III-3
Q_y	1,2	Voir tableau III-3
Site	S ₃	Site meuble d'après le rapport géotechnique
T₁	0.15	Site S ₃
T₂	0.5	Site S ₃

Le tableau ci-dessous clarifie les valeurs sélectionnées pour les facteurs de qualité, aussi bien pour le sens X que le sens Y, conformément à l'article 4.2.3 :

Tableau III-II : Valeurs des pénalités P_q.

Critère q	P _q			
	Suivant x		Suivant y	
	Observé	Non observé	Observé	Non observé
1 condition minimale sur les files de contreventement	-	0,05	-	0,05
2 Redondances en plan	-	0,05	-	0,05
3 Régularité en plan	-	0,05	-	0,05
4 Régularité en élévation	-	0,05	-	0,05
5 Contrôle de la qualité des matériaux	0	-	0	-
6 Contrôle de la qualité de l'exécution	0	-	0	-
Somme	0,2		0,2	

III.5.2.2.1 Spectre de réponse sur ETABS :

- Le spectre de réponse de calcul donné par le RPA est introduit sous forme de fichier texte généré par des applications comme RPA99 (Figure III-5).

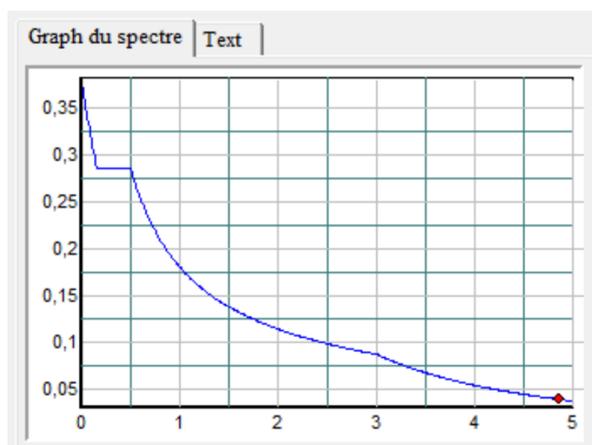


Figure III-6 Spectre de réponse généré par l'application RPA99

- Pour l'orientation de la sollicitation sismique, on considérera deux directions orthogonales X et Y.

III.5.3 Modélisation de la masse sismique

Le poids W est égal à la somme des poids de tous les niveaux du bâtiment, comprenant à la fois les charges permanentes et une fraction (β) des charges d'exploitation.

$$W_i = W_{Gi} + \beta W_{Qi}$$

Avec :

W_{Gi} : Poids des charges permanentes et a celles des équipements fixes éventuels, solidaires de la structure.

W_{Qi} : Charges d'exploitation.

β : Coefficients de pondération, fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation et donné par le tableau 4.5 de l' RPA99 version 2003.

Pour notre type d'ouvrage β est établi à la valeur de 0,3.

Voici une synthèse des valeurs des charges calculées pour les différents niveaux de notre cas d'étude, présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-III : Poids sismiques de la structure.

Niveau	Poids (KN)
Toitures	23893,58
Niveau 06	47787,16
Niveau 05	71680,74
Niveau 04	95574,32
Niveau 03	119467,90
Niveau 02	143235,89
Niveau 01	157834,34
RDC	230927,32
Sous-sol 01	301084,89
Sous-sol 02	350018,37

Donc on peut déduire le poids total de la structure :

$$W_{tot} = 350018,37 \text{KN}$$

III.5.4 Diaphragme

Pour garantir une rigidité optimale des planchers, il est essentiel de connecter tous les points d'intersection au sein d'un même plancher à leurs points de référence, créant ainsi une structure en diaphragme.

L'option diaphragme sera retirée lors de la modélisation de l'effet de température qui sera abordée dans les paragraphes suivants.

III.5.5 Modélisation du voile périphérique :

Le voile périphérique est un panneau vertical en béton armé entourant une partie ou la totalité du l'immeuble, destiné à soutenir l'action des poussées.

- Hauteur sous-sol 01 : 4,22m.
- Hauteur sous-sol 02 : 3,3m.

Les étapes de modélisation du voile périphérique du bloc B du projet sont les suivantes :

1. Détermination de l'emplacement du voile périphérique du bloc B :

Identification du positionnement du voile périphérique dans la zone du projet afin (Figure III-7) de déterminer les caractéristiques géotechniques relatives à cette zone.



Figure III-8 Emplacement du voile périphérique

2. Détermination des caractéristiques géotechniques relatives à l'emplacement :

Les caractéristiques géotechniques nécessaires pour l'évaluation des charges à appliquer sur le voile périphérique sont :

- φ : L'angle de frottement interne du sol ($^{\circ}$).
- γ : Le poids volumique (t/m^3).

En se basant sur l'extrait du rapport géotechnique joint en annexe C et la localisation du voile périphérique du bloc B (Figure III-9), on peut noter que les sondages carottés concernés pour déterminer les caractéristiques géotechniques sont : SC3, SC5 et SC7.

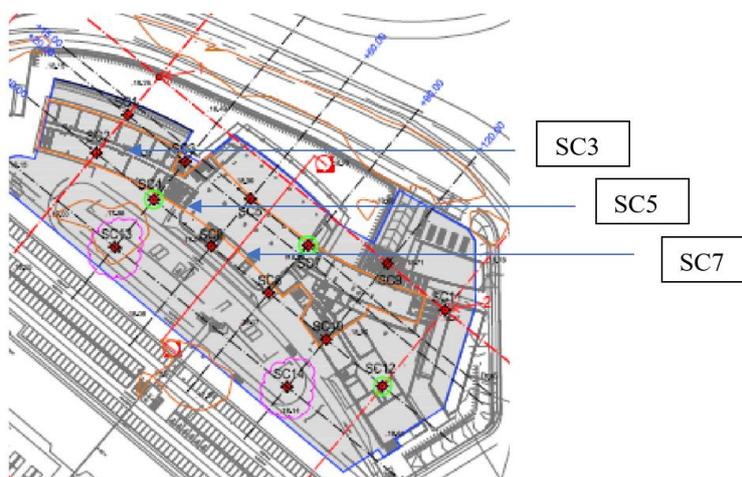


Figure III-10 Plan d'implantation des sondages carottés (SC)

a) **Détermination de l'angle de frottement interne du sol**

Selon l'extrait du rapport géotechnique inclus en annexe D, les essais du cisaillement à la boîte de Cassagnarde (NF P94-071-1) ont donné les résultats suivants :

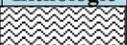
Tableau III-IV : Résultats essais du cisaillement à la boîte de Cassagnarde

Sondages N°	Profondeur (m)	Type d'essai	C' (bars)	ϕ' (°)
SC1	11.80-12.50	CD	0.21	24.30
	31.20-32.00	CD	0.36	22.50
SC2	03.40-03.90	CD	0.36	22.50
	14.30-15.00	CD	0.21	25.00
SC3	12.20-12.70	CD	0.34	21.90
SC4	14.20-15.20	CD	0.68	17.4
	38.00-38.70	CD	0.42	19.40
	35.20-35.80	CD	0.14	29.3
SC5	29.50-30.00	CD	0.15	31.00
SC6	30.40-31.00	CD	0.5	28.50
	33.40-33.90	CD	0.54	16.40
SC7	10.50-12.00	CD	0.25	23.90
	29.10-29.80	CD	0.31	20.90

Nous observons une différence entre la profondeur du SC5 et la profondeur du niveau des caractéristiques recherchées. Cette observation souligne l'importance de prendre en considération les sondages carottés SC3 et SC7 dont les profondeurs se rapprochent de la profondeur du niveau des caractéristiques recherchées.

Selon la coupe géologique extraite de l'extrait du rapport géotechnique inclus dans l'annexe D, qui met en évidence la présence d'une couche d'argile marneuse peu sableuse jusqu'à une profondeur de 20 mètres, nous supposons l'absence de variation significative de l'angle de frottement. Par conséquent, nous adopterons la valeur la plus défavorable de l'angle de frottement, soit $\phi = 23,90^\circ$.

Tableau III-V : Coupe géologique

Profondeur	Lithologie	Nature
00 ^m 00 – 00 ^m 60		terre végétale
00 ^m 60 – 10 ^m 50		argile marneuse peu sableuse de couleur brunâtre.
10 ^m 50 – 20 ^m 00		argile marneuse, peu sableuse à inclusion graveleuse de couleur grise bariolée de beige.
20 ^m 00 – 25 ^m 50		dépôts alluvionnaires constitués de sable limono-argileux, très graveleux et caillouteux.
25 ^m 50 – 40 ^m 00		marne argileuse de couleur grise et beige

b) Détermination du poids volumique

Selon l'extrait du rapport géotechnique inclus en annexe D, les essais d'identification selon la norme (NF P94-053) ont donné les résultats suivants :

Tableau III-VI - Résultats des essais d'identification

Sondages N°	Profondeur (m)	ω (%)	γ_h (t/m ³)	γ_d (t/m ³)	S_r (%)	Interprétation des résultats Selon la norme XP P 94-011
SC1	11.80-12.50	24.59	2.03	1.63	100	Sol dense, saturé
	31.20-32.00	24.59	2.14	1.71	100	Sol dense, saturé
SC2	03.40-03.90	23.89	2.04	1.64	100	Sol dense, saturé
	14.30-15.00	26.09	2.08	1.65	100	Sol dense, saturé
SC3	12.20-12.70	24.42	1.99	1.60	96	Sol dense, non saturé
SC4	14.20-25.00	24.05	2.03	1.64	100	Sol dense, saturé
	35.20-35.80	25.34	2.02	1.61	99.09	Sol dense, non saturé
	38.00-38.70	14.00	2.03	1.78	72.99	Sol dense, non saturé
SC5	11.00-12.00	25.62	2.03	1.62	100	Sol dense, saturé
	24.20-24.70	21.65	2.03	1.67	94.62	Sol dense, non saturé
	29.50-30.00	21.76	2.02	1.66	93.63	Sol dense, non saturé
SC6	30.40-31.00	20.21	2.14	1.78	100	Sol dense, saturé
	33.40-33.90	14.14	2.19	1.92	94	Sol très dense, non saturé
SC7	10.50-12.00	24.53	2.01	1.61	98	Sol dense, non saturé
	29.10-29.80	21.29	2.10	1.73	100	Sol dense, saturé

Selon la même approche, nous constatons que la profondeur des sondages carottés SC3, SC5 et SC7 se rapprochent la profondeur du niveau des caractéristiques recherchées. Nous adopterons ainsi : $\gamma = 2.03$ (t/m³).

3. Évaluation des charges de poussée et des surcharges :

Pour le calcul des contraintes, on va procéder au calcul des poussées des terres ainsi qu'aux surcharges sur les deux sous-sols :

a) Poussée des terres :

$$P_t = K_a \cdot \gamma \cdot z$$

P_t : Poussée des terres (KN/m²).

K_a : Coefficient de poussées des terres.

γ : Poids volumique du sol (KN /m³).

z : hauteur du voile (m).

$$K_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) = 0,42$$

$$\text{à } z = 4,22\text{m} \quad P_t = K_a \cdot \gamma \cdot z = 35,98 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{à } z = 7,52\text{m} \quad P_t = K_a \cdot \gamma \cdot z = 64,12 \text{ KN/m}^2$$

b) Surcharges :

$$P_s = K_0 \cdot q$$

P_s : Pression due à la surcharge (KN/m²).

K_0 : Coefficient de poussées des terres au repos.

q : Surcharges d'exploitation (KN /m²).

$$K_0 = 1 - \sin(\varphi) = 0,59$$

$$P_s = K_0 \cdot q = 7,08 \text{ KN/m}^2$$

4. Modélisation sur ETABS :

- Il est possible d'utiliser les options de charges non uniformes (Figure III-11) sur les éléments SHELL pour appliquer les charges de poussées des terres sur les voiles périphériques. La direction considérée sera « Local-3 » correspondant à l'axe local du voile.

Les valeurs pour A et B sont nulles, car la charge ne changera pas dans les directions X ou Y. La valeur C correspond au changement de la charge parallèlement à l'axe Z.

- Pour appliquer les surcharges, l'option de charges uniformes (Figure III-12), La direction considérée sera « Local-3 » correspondant à l'axe local du voile.

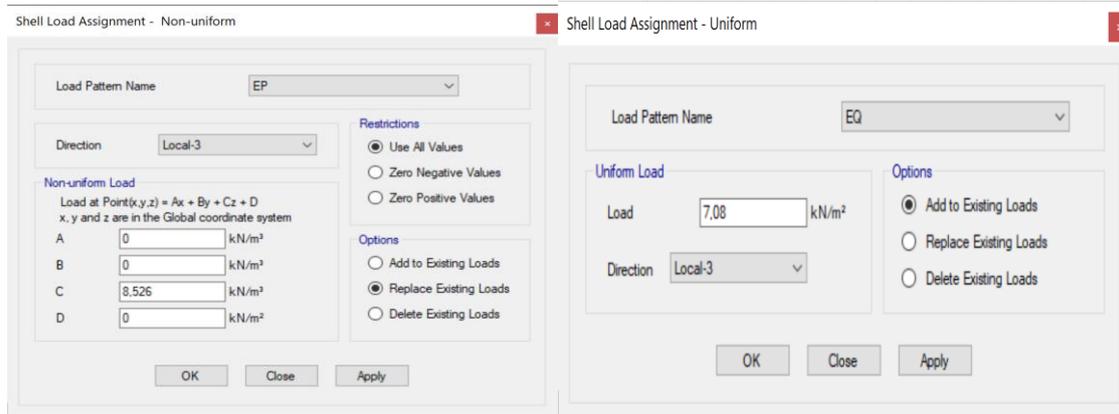


Figure III-13 Charges uniformes et non uniformes sur ETABS

III.5.6 Encastrement de la structure

Des encastremets ont été affectés à la base de la structure, préparant ainsi le modèle pour une analyse structurelle.

III.5.7 Modélisation de l'effet de température

Pour la modélisation sous l'effet thermique sur le logiciel ETABS, on modélise le même modèle dans un fichier distinct contenant les charges permanentes, les charges d'exploitation et les charges thermiques sous forme de différence de température, exprimées par les valeurs maximales (T°_{\max}) et minimales (T°_{\min}) (Figure III-14).

Cette démarche s'accompagne de la désactivation de l'effet diaphragme, permettant ainsi aux éléments de la structure de subir des allongements et des raccourcissements en réponse aux variations thermiques.

La température est appliquée à l'enveloppe du bâtiment, affectant ainsi tous les éléments constamment exposés aux conditions climatiques extérieures :

- Poutres extérieures.
- Poteaux et voiles extérieurs.
- Plancher terrasse.

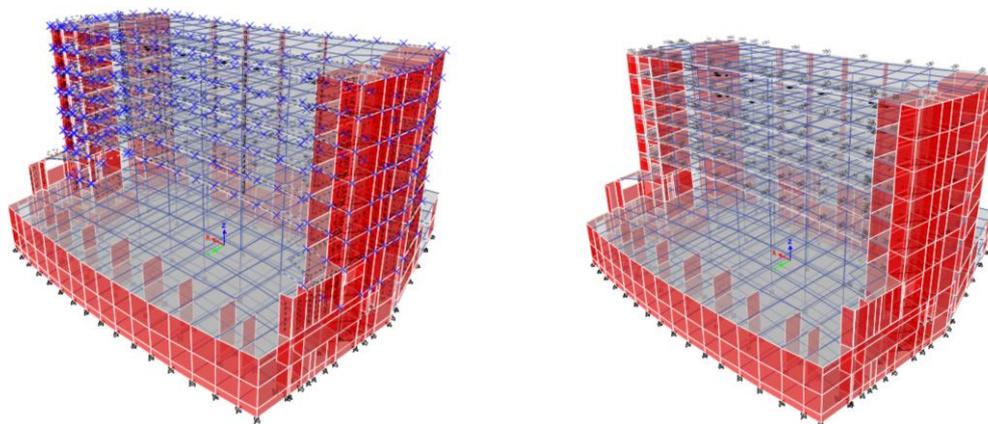


Figure III-15 Modélisation effet de température sur ETABS

III.6 Résultats et vérification de l'analyse

III.6.1 Analyse modale

Pour les structures représentées par des modèles en deux directions orthogonales, le choix du nombre de modes de vibration à prendre en compte dans chaque direction d'excitation est soumis aux critères suivants :

- La somme des masses modales effectives pour les modes sélectionnés doit constituer au moins 90 % de la masse totale de la structure, ou tous les modes ayant une masse modale effective dépassant 5 % de la masse totale de la structure doivent être inclus pour évaluer la réponse globale de la structure.
- Un minimum de trois (03) modes doit être retenu dans chaque direction envisagée.

Dans le tableau suivant, nous pouvons observer les périodes, les déplacements, les rotations et les participations massiques des premiers modes :

Tableau III-VII Résultats ETABS de l'analyse modale

Cas	N° Mode	Période (sec)	U _x	U _y	Somme U _x	Somme U _y	R _z	Somme R _z
Mode	1	0,657	0,3714	0,0067	0,3714	0,0067	0,0003	0,0003
Mode	2	0,512	0,0066	0,3677	0,3781	0,3744	0,0128	0,0131
Mode	3	0,322	0,0068 10 ⁻³	0,0132	0,3781	0,3876	0,3218	0,3349

Les résultats des trois premiers modes ont été exposés, et la suite des résultats est consignée dans l'annexe A.

- Les 84 premiers modes ont une masse modale cumulée dépassant les **90%**.
- Les trois premiers modes sont les suivants :
 - Le premier mode représente un mode de translation selon x-x (Figure III-16).
 - Le second mode représente un mode de translation selon y-y (Figure III-17).
 - Le troisième mode représente un mode de torsion (Figure III-18).

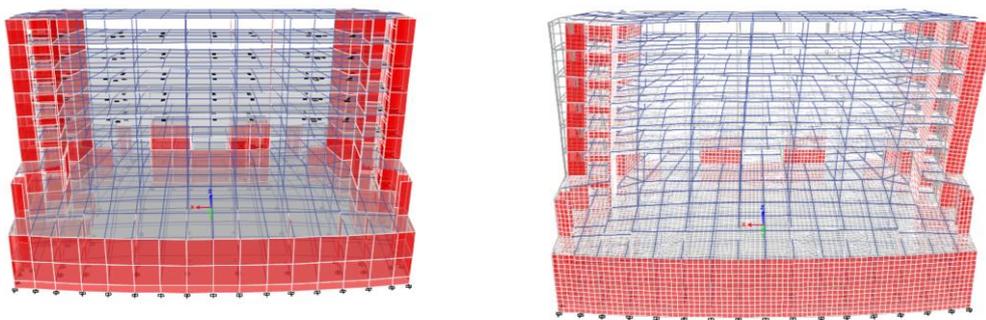


Figure III-19 Vue 3D du Mode 01

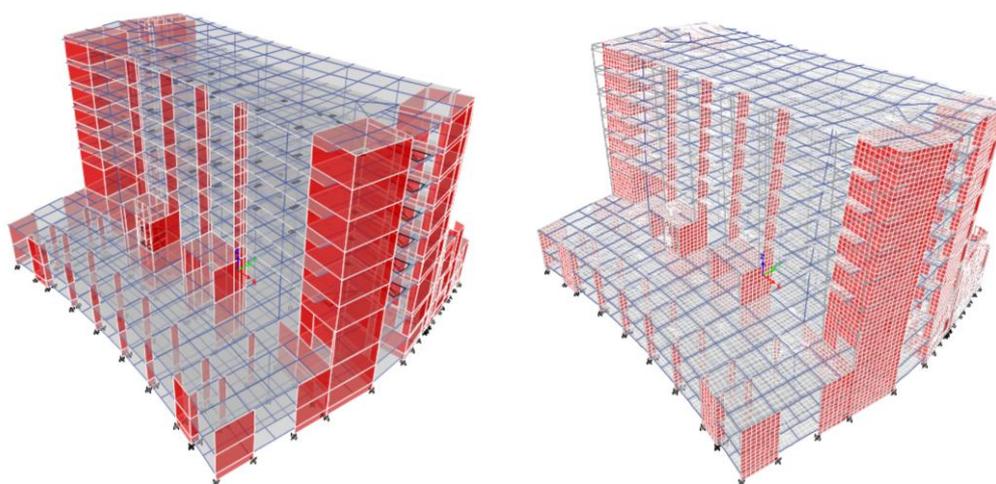


Figure III-20 Vue 3D du mode 02

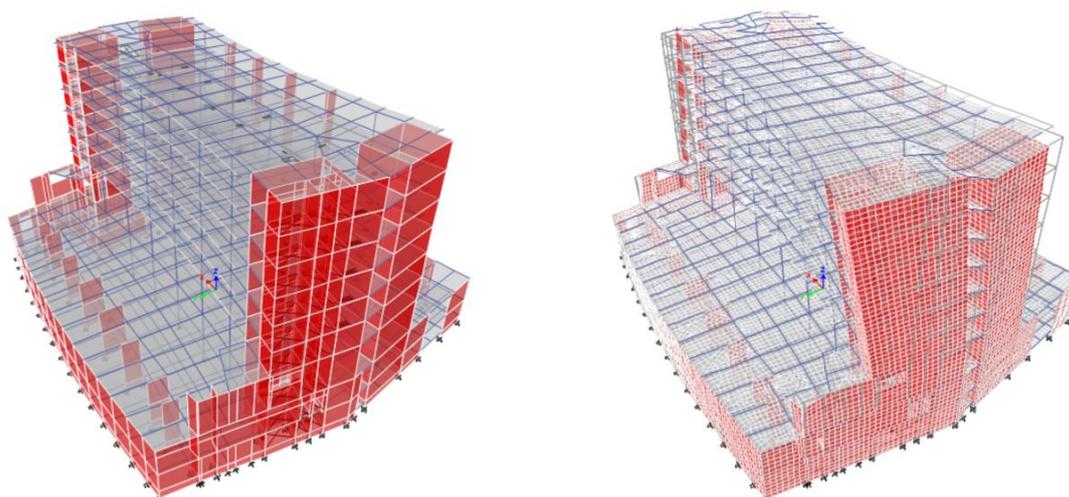


Figure III-21 Vue 3D du mode 03

III.6.2 Justification du système de contreventement

Pour justifier le système de contreventement, il est possible de se référer à l'article 3.4 de la RPA 1999 version 2003. Cet article stipule que si un système se compose en tout ou en partie de voiles, et s'il supporte au moins 20% des charges verticales appliquées, on peut considérer que le système de contreventement est formé par des voiles en béton armé.

Tableau III-VIII : Pourcentage des charges reprises par les voiles et les poteaux

Niveaux	Charges (KN)			Pourcentage repris %		Observation
	Voiles	Portiques	Total	Voiles	Portiques	
Niveau 06	13791,82	11068,93	24860,75	57	43	Vérifiée
Niveau 05	28729,62	22024,77	50754,40	57	43	Vérifiée
Niveau 04	43564,74	33083,30	76648,04	57	43	Vérifiée
Niveau 03	58297,37	44244,38	102541,68	57	43	Vérifiée
Niveau 02	72903,51	55531,81	128435,33	57	43	Vérifiée
Niveau 01	87130,67	67170,52	154301,19	56	44	Vérifiée
RDC	101340,52	67439,14	168779,66	60	40	Vérifiée
Sous-sol 01	182038,10	86233,82	268271,93	68	32	Vérifiée
Sous-sol 02	258861,16	107015,31	365876,48	29	71	Vérifiée

→ Ainsi, nous confirmons que le système de contreventement est formé par des voiles en béton armé (R=3,5). L'hypothèse énoncée dans le paragraphe I-5 est vérifiée.

III.6.3 Période fondamentale

Les règles parasismiques algériennes proposent deux formules empiriques pour le calcul de la période

$$T_e = C_T h_N^{3/4}$$

h_n hauteur mesurée en mètre à partir de la base de la structure jusqu'au dernier niveau (N) : 24.69 m.

C_T : est un coefficient qui est en fonction du système de contreventement, du type de remplissage est donné par le tableau 4.6 du RPA99 version 2003.

La seconde formule, quant à elle, est comme suit :

$$T = \frac{0.09hN}{\sqrt{D}} \quad (\text{III.20})$$

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

Il y a lieu de retenir dans chaque direction considérée la plus petite des deux valeurs données par les deux formules précédentes.

Pour ce qui est de notre études le contreventement de la structure est assuré par des voile en béton armé ce qui donne une valeur du coefficient C_t égale à 0,05.

Étant donné que la hauteur totale de la structure est de 28,8 on peut conclure :

$$T_{\text{empirique}} = 0,05 \times 28,8^{3/4} = 0,62 \text{ s}$$

Le calcul est ensuite effectué selon la seconde formule dans les directions X et Y, ce qui conduit à :

$$\begin{array}{llll} \text{Selon le sens x-x} & D = 63\text{m} & \Rightarrow & T_x = 0,33 \text{ s} \\ \text{Selon le sens y-y} & D = 53\text{m} & \Rightarrow & T_y = 0,36 \text{ s} \end{array}$$

Donc, nous pouvons déduire les valeurs des périodes empiriques selon les deux sens X et Y :

$$\begin{cases} T_x = 0,33 \text{ s} \\ T_y = 0,36 \text{ s} \end{cases}$$

En ce qui concerne les périodes numériques, il s'agit de celles obtenues à l'aide du modèle par éléments finis sur le logiciel ETABS 20.

$$T_{\text{numérique}} = 0,64 \text{ s}$$

Une fois les calculs des périodes analytique et numérique réalisés, il reste à vérifier si la condition requise par le RPA est respectée ou non.

$$\begin{array}{l} T_{\text{numérique}} < 1.3 T_{\text{Empirique x}} \\ T_{\text{numérique}} < 1.3 T_{\text{Empirique y}} \end{array}$$

Or, nous avons :

$$0,64 \text{ s} > 1,3 \times 0,33 = 0,43 \text{ s}$$

$$0,64 \text{ s} > 1,3 \times 0,36 = 0,47 \text{ s}$$

Tableau III-IX: Vérification de la période fondamentale.

	T_d	T_e	1,3 T_e	Observation
Sens x-x	0,622	0,33	0,43	Non vérifiée
Sens y-y		0,36	0,47	Non vérifiée

⇒ Donc, la condition n'est pas vérifiée.

La période sélectionnée pour le calcul du facteur d'amplification dynamique pour les axes x et y est équivalente à 130% de la période empirique dans chaque cas.

$$\begin{cases} T_x = 0,43 \text{ sec} \\ T_y = 0,47 \text{ sec} \end{cases}$$

III.6.4 Calcul de l'effort tranchant par la méthode modale spectrale :

Les valeurs des efforts tranchants pour les deux sens X et Y sont prises à partir du logiciel ETABS :

$$\begin{cases} V_{dynamique\ x} = 54991,05 \text{ KN} \\ V_{dynamique\ y} = 56031,87 \text{ KN} \end{cases}$$

III.6.5 Calcul de l'effort tranchant par la méthode statique équivalente

La force sismique à la base est donnée par la formule suivante :

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

Avec :

A : coefficient d'accélération de zone.

Q : facteur de qualité.

R : coefficient de comportement de la structure.

W : Poids total de la structure.

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

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

L'amortissement est déterminé selon les explications fournies dans la section (IV-7-3), en dépendance de la période de référence. Par conséquent, les valeurs suivantes sont adoptées pour le facteur d'amplification dynamique :

$$\begin{cases} D_x = 1,9 \\ D_y = 1,9 \end{cases}$$

Et donc :

$$\begin{cases} V_{Statique\ x} = 68403,59KN \\ V_{Statique\ y} = 68403,59\ KN \end{cases}$$

III.6.6 Vérification de l'effort tranchant

D'après les règles **RPA99 version 2003**, il faut que :

La somme des forces sismiques à la base ($V_{dynamique}$) obtenue par la combinaison des valeurs modales ne doivent pas être inférieure à 80 % de la somme des forces sismiques déterminées par la méthode statique équivalente ($V_{statique}$).

$$0.80 \times V_{statique\ x} < V_{dynamique} \quad \rightarrow \quad 0.80 \times V_{statique\ y} = 54722,87KN$$

$$0.80 \times V_{statique\ x} < V_{dynamique} \quad \rightarrow \quad 0.80 \times V_{statique\ y} = 54722,87KN$$

⇒ Alors la condition est vérifiée.

III.6.7 Vérification des sollicitations normales (effort normal réduit)

Selon l'article 7.4.3.1 du règlement parasismique algérien RPA 99 / Version 2003, dans le but d'éviter ou limiter le risque de rupture fragile sous sollicitations d'ensemble dues au séisme, l'effort normal de compression de calcul est limité par la condition suivante :

$$v = \frac{N_d}{B_c \cdot f_{c28}} \leq 30$$

v : effort normal réduit.

N_d : effort normal de compression maximal. (**ETABS 20**)

B_c : section brute de l'élément.

f_{c28} : résistance caractéristique du béton.

Les tableaux ci-dessous illustrent les résultats d'une étude visant à vérifier l'effort normal réduit sur différents poteaux rectangulaires de dimensions 40 x 90 et d'autres de forme circulaire avec des diamètres respectifs de 40 et 50, répartis aux différents niveaux.

Tableau III-X : Vérification de l'effort normal réduit pour les poteaux circulaires.

Niveau	Sections		N_d	f_{c28}	ν	Observation
	D (cm)	Aire (cm ²)				
Toiture	40	1256,63	80,40	35	0,0018	Vérifiée
Niveau 06	40	1256,63	174,16	35	0,0039	Vérifiée
Niveau 05	40	1256,63	278,27	35	0,0063	Vérifiée
Niveau 04	40	1256,63	389,79	35	0,0088	Vérifiée
Niveau 03	40	1256,63	503,14	35	0,0114	Vérifiée
Niveau 02	50	1963,49	804,42	35	0,0117	Vérifiée
Niveau 01	50	1963,49	1011,42	35	0,0147	Vérifiée
RDC	40	1256,63	49,66	35	0,0011	Vérifiée
	50	1963,49	1061,94	35	0,0154	Vérifiée
Sous-sol 01	40	1256,63	72,88	35	0,0016	Vérifiée
	50	1963,49	1396,18	35	0,0203	Vérifiée
Sous-sol 02	40	1256,63	82,66	35	0,0018	Vérifiée
	50	1963,49	1566,32	35	0,0227	Vérifiée

Tableau III-XI : Vérification de l'effort normal réduit pour les poteaux rectangulaires.

Niveau	Sections			N_d	f_{c28}	ν	Observation
	b (cm)	h (cm)	Aire(cm ²)				
Toiture	40	90	3600	138,85	35	0,0011	Vérifiée
Niveau06	40	90	3600	323,60	35	0,0025	Vérifiée
Niveau05	40	90	3600	508,62	35	0,0040	Vérifiée
Niveau04	40	90	3600	691,81	35	0,0054	Vérifiée
Niveau03	40	90	3600	868,16	35	0,0068	Vérifiée

→ Selon les résultats présentés, il a été démontré que les efforts normaux sont vérifiés pour tous les poteaux.

III.6.8 Vérification des déplacements latéraux inter-étages

Le déplacement horizontal à chaque niveau « K » est calculé comme suit :

$$\delta_k = R \times \delta_{ek}$$

Avec :

δ_{ek} : déplacement du aux forces sismiques.

R : coefficient de comportement.

Tableau III-XII : Calcul des déplacements selon x-x et y-y

Niveau	δ_{ek} (cm)		δ_k (cm)	
	Selon x	Selon y	Selon x	Selon y
Toiture	4,32	3,62	15,12	12,67
Niveau 06	3,70	3,08	12,95	10,78
Niveau 05	3,05	2,53	10,67	8,85
Niveau 04	2,37	1,99	8,29	6,96
Niveau 03	1,6	1,46	5,60	5,11
Niveau 02	1,05	0,98	3,67	3,43
Niveau 01	0,55	0,18	1,92	0,63
RDC	0,12	0,06	0,42	0,21

Le déplacement relatif au niveau « k » par rapport au niveau « k – 1 » est calculé comme suit :

$$\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1}$$

Tableau III-XIII : Calcul des déplacements relatifs selon x-x et y-y

Niveau	δ_k (cm)		δ_{k-1} (cm)		Δ_k (cm)	
	Selon x	Selon y	Selon x	Selon y	Selon x	Selon y
Toiture	4,32	3,62	3,70	3,08	0,62	0,54
Niveau 06	3,70	3,08	3,05	2,53	0,65	0,55
Niveau 05	3,05	2,53	2,37	1,99	0,68	0,54
Niveau 04	2,37	1,99	1,6	1,46	0,77	0,53
Niveau 03	1,6	1,46	1,05	0,98	0,55	0,48
Niveau 02	1,05	0,98	0,55	0,18	0,50	0,80
Niveau 01	0,55	0,18	0,12	0,06	0,43	0,12
RDC	0,12	0,06	0	0	0,12	0,06

Selon l'article 5.10 du règlement parasismique algérien RPA 99 / Version 2003, les déplacements relatifs latéraux d'un étage par rapport aux étages qui lui sont adjacents ne doivent pas dépasser 1.0 % de la hauteur de l'étage.

Tableau III-XIV : Vérification des déplacements inter étages selon la direction x-x.

Niveau	h_e (cm)	$\Delta_{k(x)}$ (cm)	1% h_e (cm)	Observation
Toitures	391	0,62	3,91	Vérifiée
Niveau 06	391	0,65	3,91	Vérifiée
Niveau 05	391	0,68	3,91	Vérifiée
Niveau 04	391	0,77	3,91	Vérifiée
Niveau 03	391	0,55	3,91	Vérifiée
Niveau 02	391	0,50	3,91	Vérifiée
Niveau 01	574	0,43	5,74	Vérifiée
RDC	422	0,12	4,22	Vérifiée

Tableau III-XV : Vérification des déplacements inter étages selon la direction y-y.

Niveau	h_e (cm)	$\Delta_{k(y)}$ (cm)	1% h_e (cm)	Observation
Toitures	391	0,54	3,91	Vérifiée
Niveau 06	391	0,55	3,91	Vérifiée
Niveau 05	391	0,54	3,91	Vérifiée
Niveau 04	391	0,53	3,91	Vérifiée
Niveau 03	391	0,48	3,91	Vérifiée
Niveau 02	391	0,80	3,91	Vérifiée
Niveau 01	574	0,12	5,74	Vérifiée
RDC	422	0,06	4,22	Vérifiée

III.6.9 Justification vis-à-vis de l'effet P- Δ

Selon l'article 5.9 du règlement parasismique algérien RPA 1999 Version 2003, les effets (P- Δ) peuvent être négligés dans le cas des bâtiments si la condition suivante est satisfaite à tous les niveaux :

$$\theta = \frac{P_k \cdot \Delta_k}{V_k h_k} \leq 0.10$$

P_k : Poids total de la structure et des charges d'exploitation associées au dessus du niveau « k »

$$P_k : \sum_{i=k}^n (W_{gi} + \beta W_{qi})$$

V_k : Effort tranchant d'étage au niveau k

Δ_k : Déplacement relatif du niveau «k » par rapport au niveau « k-1 »

h_k : Hauteur de l'étage « k »

Tableau III-XVI : Vérification de l'effet P- Δ dans le sens x-x.

Niveau	P_k (KN)	$\Delta_{k(x)}$ (cm)	V_k (KN)	h_k (cm)	θ	Observation
Toitures	23893,58	0,62	11368,74	391	0,00333	Vérifiée
Niveau 06	47787,16	0,65	19167,73	391	0,00414	Vérifiée
Niveau 05	71680,74	0,68	25195,29	391	0,00495	Vérifiée
Niveau 04	95574,32	0,77	29959,84	391	0,00628	Vérifiée
Niveau 03	119467,90	0,55	33962,56	391	0,00495	Vérifiée
Niveau 02	143235,89	0,50	36971,49	391	0,00495	Vérifiée
Niveau 01	157834,34	0,43	38047,24	574	0,00311	Vérifiée
RDC	230927,32	0,12	43504,96	422	0,00151	Vérifiée

Tableau III-XVII : Vérification de l'effet P- Δ dans le sens y-y.

Niveau	P_k (KN)	$\Delta_{k(y)}$ (cm)	V_k (KN)	h_k (cm)	θ	Observation
Toitures	23893,58	0,54	11873,22	391	0,00278	Vérifiée
Niveau 06	47787,16	0,55	21053,41	391	0,00319	Vérifiée
Niveau 05	71680,74	0,54	28435,73	391	0,00348	Vérifiée
Niveau 04	95574,32	0,53	34341,62	391	0,00377	Vérifiée
Niveau 03	119467,90	0,48	38765,03	391	0,003,78	Vérifiée
Niveau 02	143235,89	0,80	41874,51	391	0,00700	Vérifiée
Niveau 01	157834,34	0,12	43050,56	574	0,00766	Vérifiée
RDC	230927,32	0,06	48685,15	422	0,00674	Vérifiée

III.7 Conclusion

Lors de la modélisation d'une structure irrégulière, il est impératif de d'assurer qu'il reflète fidèlement la géométrie et les propriétés matérielles de la structure réelle. Il est nécessaire également de vérifier la connectivité des nœuds pour éviter toute discontinuité et problème de maillage.

Conformément aux directives énoncées par le règlement parasismique algérien, nous avons entrepris une analyse sismique de l'ensemble du projet. Notamment, la période, l'effort tranchant à la base, les sollicitations normales, ainsi que les déplacements latéraux inter-étages.

Nous avons également entrepris une modélisation distincte de l'effet de la température afin de pouvoir analyser de manière son impact sur la structure. Ce qui sera illustré dans le chapitre suivant.

IV. Ferrailage des Eléments Structuraux

IV.1 Introduction

Dans le chapitre à venir, alors que nous disposons désormais des plans d'exécution, notre objectif principal sera de vérifier la conformité des dimensions de chaque élément de structure aux règlements parasismiques, nous allons présenter également des exemples d'application concrets pour chaque élément de structure étudié.

IV.2 Conformité à la Règlementation

IV.2.1 Les poteaux :

Selon les dispositions du Règlement Parasismique Algérien 1999, dans sa version de 2003, précisément à l'article 7.4.1, Pour la zone sismique III, il est impératif de se conformer aux exigences énumérées ci-dessous :

En ce qui concerne les poteaux rectangulaires, nous devons vérifier que :

$$\begin{aligned} \text{Min}(b_1, h_1) &\geq 30\text{cm} \\ \text{Min}(h_1/b_1) &\geq h_e/20 \\ 1/4 < h_1/b_1 < 4 \end{aligned}$$

Pour les cas d'étude, nous disposons d'une section rectangulaire de 40 x 90.

Tableau IV-I : Vérification des conditions de l'RPA sur les poteaux rectangulaires.

Condition RPA	Cas d'étude	Observation
$\min(b_1, h_1) \geq 30\text{cm}$	$\min(40, 90) \geq 30\text{cm}$	Vérifiée
$\min(h_1/b_1) \geq h_e/20$	$\min(2, 25) \geq 0,19$	Vérifiée
$1/4 < b_1/h_1 < 4$	$0,25 < 0,44 < 4$	Vérifiée

Avec :

b_1 : Longueur de la poutre.

h_1 : Largeur de la poutre.

h_e : Hauteur d'étage.

En ce qui concerne les poteaux circulaires, nous devons vérifier que :

$$\begin{aligned} D &\geq 35 \\ D &\geq h_e/15 \end{aligned}$$

Pour les cas d'étude, nous disposons de deux types de section circulaire :

- Diamètre de 40cm.
- Diamètre de 50cm.

La hauteur d'étage maximale est de 5,74 m.

Tableau IV-II : Vérification des conditions de l'RPA sur les poteaux circulaires.

Condition RPA	Cas d'étude	Observation
$D \geq 35$	$40 \geq 35$	Vérifiée
$D \geq h_e/15$	$40 \geq 38,26$	Vérifiée

→ Donc les sections des poteaux sont conformes aux règles parasismiques RPA99 version 2003.

IV.2.2 Les poutres

Selon les dispositions du règlement parasismique algérien RPA 1999 Version 2003, précisément à l'article 7.5.1, pour la zone sismique III, il est impératif de se conformer aux exigences énumérées ci-dessous :

$$b \geq 20cm$$

$$h \geq 30$$

$$h/b \leq 4$$

Pour les cas d'étude, nous disposons des sections rectangulaires suivantes : (*)

20x40 ; 25 x 45 ; 30 x40; 30x 50 ; 30x55 ; 30x60 ;30x65 ;30x70.

Vérification des conditions de l'RPA sur les poutres.

Condition RPA	Cas d'étude	Observation
$b \geq 20cm$	$\min (*) \geq 20cm$	Vérifiée
$h \geq 30$	$\min (*) \geq 30$	Vérifiée
$h/b \leq 4$	$\min(*) \leq 4$	Vérifiée

→ Donc les sections des poutres sont conformes aux règles parasismiques RPA99 version 2003.

IV.2.3 Les voiles

La justification du prédimensionnement des voiles de contreventement en béton armé est basée sur l'article 7.7.1 du RPA99/Version2003 et comprend les vérifications suivantes :

- L'épaisseur minimale du voile est de 15cm.
- La largeur du voile doit être supérieure à quatre fois son épaisseur.
- Conditions de rigidité aux extrémités.

Pour les cas d'étude, nous disposons des épaisseurs suivantes :

20 cm ; 25 cm ; 30 cm ; 35 cm ;40 cm.

-L'épaisseur minimale du voile est de 15cm.

Tableau IV-III : Vérification de la première condition pour le dimensionnement des voiles.

a (cm)	Observation
20	Vérifiée
25	Vérifiée
30	Vérifiée
35	Vérifiée
40	Vérifiée

- La largeur du voile doit être supérieure à quatre fois son épaisseur.

Les vérifications applicables à notre cas d'étude sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau IV-IV : Vérification de la deuxième condition pour le dimensionnement des voiles.

l_{min} (cm)	a (cm)	Observation
3,2	20	Vérifiée
3,1	25	Vérifiée
120	30	Vérifiée
170	35	Vérifiée
220	40	Vérifiée

- La condition de rigidité aux extrémités englobe trois cas différents :

Les différents cas sont mentionnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV-V : Vérification de condition de rigidité aux extrémités des voiles.

	Condition	a (cm)	h_e (cm)	Observation
Cas 1	$a \geq h_e/20$	20	330	Vérifiée
			422	Vérifiée
		30	330	Vérifiée
			422	Vérifiée
Cas 2	$a \geq h_e/22$	40	330	Vérifiée
			422	Vérifiée
Cas 3	$a \geq h_e/25$	20	330	Vérifiée
			422	Vérifiée
		25	330	Vérifiée
			422	Vérifiée
			574	Vérifiée
			391	Vérifiée
		30	330	Vérifiée
			422	Vérifiée
			574	Vérifiée
			391	Vérifiée
		35	330	Vérifiée
			422	Vérifiée
574	Vérifiée			
391	Vérifiée			

En ce qui suit, nous allons procéder au ferrailage des éléments suivants :

- Élément poutre de section 30 x 55.
- Élément poteau de section rectangulaire de section 40 x 90.
- Élément voile plein d'épaisseur 30 cm.
- Élément dalle d'épaisseur 20cm.

IV.3 Ferrailage des poteaux :

Dans le cadre du ferrailage des poteaux, il est essentiel de déterminer les types d'efforts internes et les combinaisons de charges afin de déterminer les sections d'armatures longitudinales et transversales.

Cela se fait selon les 03 cas suivants :

- N_{\max} → M correspondant.
- N_{\min} → M correspondant.
- M_{\max} → N correspondant.

IV.3.1 Combinaisons de charges

Le calcul se fait sous l'action des sollicitations déterminées par les combinaisons règlementaires suivantes :

- ELU : $1.35 G + 1.5 Q$
- ELS : $G + Q$
- ELA : $0.8G + E$
- ELA : $G + Q + E$

IV.3.2 Prescriptions Ferrailage des poteaux

Le ferrailage des poteaux a été réalisé en conformité avec les exigences définies par les normes parasismiques algériennes RPA99/Version 2003.

IV.3.2.1 Armatures longitudinales :

Selon l'article 7.4.2.1 RPA 99 / Version 2003 :

- Les armatures longitudinales doivent être à haute adhérence, droites et sans crochets.
- Leur pourcentage minimal sera :

0.9% de la section de béton (zone III).

- Leur pourcentage maximal sera de :

4% de la section de béton (en zone courante).

6% de la section de béton (en zone de recouvrement).

- Le diamètre minimal utilisé pour les barres longitudinales est de 12 mm.
- La longueur minimale de recouvrement est de :

50Φ (en III)

- La distance entre les barres verticales dans une surface du poteau ne doit pas dépasser:

20cm (en zone III)

- Les jonctions par recouvrement doivent être faites si à possible à l'extérieur des zones nodales (zones critiques).

IV.3.2.2 Armatures transversales :

Selon l'article 7.4.2.2 RPA 99 / Version 2003 :

- Les armatures transversales sont calculées à l'aide de la formule :

$$\frac{A_t}{t} = \frac{\rho V_u}{h f_e}$$

Avec :

V_u : Effort tranchant de calcul.

h : Hauteur totale de la section brute.

f_e : Contrainte limite élastique de l'acier d'armature transversale.

ρ : Coefficient correcteur qui tient compte du mode fragile de la rupture par un effort tranchant.

$$\rho = \begin{cases} 2,50 & \lambda_g \geq 5 \\ 3,75 & \lambda_g \leq 5 \end{cases}$$

t : Espacement des armatures transversales :

- **Zone nodale** : $t \leq 10\text{cm}$ (zone III).

- **Zone courante** : $t \leq \min\left(\frac{b_1}{2}, \frac{h_1}{2}, 10\phi_1\right)$.

Avec :

ϕ : Le diamètre minimal des armatures longitudinales du poteau.

- La quantité d'armature transversale minimale $A_t/t \cdot b_1$ en % est donnée comme suit :

Si $\lambda_g \geq 5$ 0.3%

Si $\lambda_g \geq 3$ 0.8 %

Si $3 \leq \lambda_g \leq 5$ interpoler entre les valeurs limites précédentes.

Avec :

λ_g est l'élançement géométrique du poteau.

$$\lambda_g = \frac{l_f}{a} \quad \text{ou} \quad \frac{l_f}{b}$$

Avec

a et b : Les dimensions de la section droite du poteau dans la direction de déformation considérée et l_f longueur de flambement du poteau.

- Les cadres et les étriers doivent être fermés par des crochets à 135° ayant une longueur droite de $10 \phi_t$ minimum.
- Les cadres et les étriers doivent ménager des cheminées verticales en nombre et diamètre suffisants (ϕ cheminées $> 12\text{cm}$) pour permettre une vibration correcte du béton sur toute la hauteur des poteaux.
- En cas d'utilisation de poteaux circulaires, il y a lieu d'utiliser des cerces droites individuelles (les cerces hélicoïdales continues sont interdites).

IV.3.2.3 Calcul des armatures longitudinales

- Nous allons procéder au ferrailage des poteaux rectangulaires de section 40 x 90.

Nous commençons d'abord par la détermination des sollicitations de calcul. Les résultats sont obtenus à l'aide du logiciel ETABS 20, comme présenté ci-dessus :

Tableau IV-VI : Sollicitations du poteau sous la combinaison 1.35G + 1.5Q

1.35G + 1.5Q				
Efforts	1 ^{er} cas	2 ^{ème} cas	3 ^{ème} cas	4 ^{ème} cas
N (KN)	-3384,69	-4157,76	-3384,69	-4157,76
M ₂ (KN.m)	834,89	20,29	834,89	20,29
M ₃ (KN.m)	-518,66	1097,6	-518,66	1097,60
T (KN)	482,52			

Tableau IV-VII : Sollicitations du poteau sous la combinaison 0.8G + E

0.8G + E				
Efforts	1 ^{er} cas	2 ^{ème} cas	3 ^{ème} cas	4 ^{ème} cas
N (KN)	-1011,03	-3221,80	-1015,37	-3035,77
M ₂ (KN.m)	-372,83	469,38	455,97	657,96
M ₃ (KN.m)	141,77	-9,96	525,31	24,38
T (KN)	283,26			

Tableau IV-VIII : Sollicitations du poteau sous la combinaison G + Q + E

G + Q + E				
Efforts	1 ^{er} cas	2 ^{ème} cas	3 ^{ème} cas	4 ^{ème} cas
N (KN)	-1767,05	-4567,38	-1802,83	-4354,44
M ₂ (KN.m)	-547,24	715,44	644,68	903,17
M ₃ (KN.m)	77,64	-8,15	638,45	34,35
T (KN)	391,14			

Tableau IV-IX Sollicitations du poteau sous la combinaison G + Q

G + Q				
Efforts	1 ^{er} cas	2 ^{ème} cas	3 ^{ème} cas	4 ^{ème} cas
N (KN)	-2481,83	-4499,40	-2481,83	-4499,40
M ₂ (KN.m)	609,94	801,11	609,94	801,11
M ₃ (KN.m)	-376,76	15,20	-376,76	15,20
T (KN)	352,16			

Ensuite, nous passons à la détermination des armatures longitudinales. Pour ce faire, nous commençons par déterminer la section minimale des aciers longitudinaux :

$$A_{min} = 0.9\%(b \times h) \quad (\text{Zone III})$$

Ainsi que les pourcentages maximums :

$$\begin{cases} A_{\max} = 4\% (bxh) & \text{en zone courante} \\ A_{\max} = 6\% (bxh) & \text{en zone de recouvrement} \end{cases}$$

Tableau IV-X : Sections d'armature longitudinales minimale et maximale.

Section	A_{\min} (cm ²)	A_{\max} (cm ²)	
		Zone courante	Zone de recouvrement
40 x 90	32,4	144	216

A l'aide du programme Robot Expert, nous pouvons déterminer les sections et les diamètres adoptés en prenant en compte les exigences des règlements parasismiques algériennes 1999, version 2003 :

- Combinaison 1.35G + 1.5Q :

Tableau IV-XI : Résultats de calcul des sections des armatures longitudinales

Section	1 ^{er} cas		2 ^{ème} cas		3 ^{ème} cas		4 ^{ème} cas	
	As ₁ (cm ²)	As ₂ (cm ²)	As ₁ (cm ²)	As ₂ (cm ²)	As ₁ (cm ²)	As ₂ (cm ²)	As ₁ (cm ²)	As ₂ (cm ²)
40 x 90	19,5	44,8	20,0	1	19,5	44,8	20,0	1

- Combinaison 0.8G + E:

Tableau IV-XII : Résultats de calcul des sections des armatures longitudinales

Section	1 ^{er} cas		2 ^{ème} cas		3 ^{ème} cas		4 ^{ème} cas	
	As ₁ (cm ²)	As ₂ (cm ²)	As ₁ (cm ²)	As ₂ (cm ²)	As ₁ (cm ²)	As ₂ (cm ²)	As ₁ (cm ²)	As ₂ (cm ²)
40 x 90	2,8	10,7	0,2	6,5	11,3	14,1	0,5	18,3

- Combinaison G + Q + E :

Tableau IV-XIII : Résultats de calcul des sections des armatures longitudinales

Section	1 ^{er} cas		2 ^{ème} cas		3 ^{ème} cas		4 ^{ème} cas	
	As ₁ (cm ²)	As ₂ (cm ²)	As ₁ (cm ²)	As ₂ (cm ²)	As ₁ (cm ²)	As ₂ (cm ²)	As ₁ (cm ²)	As ₂ (cm ²)
40 x 90	1,7	16,7	0,5	27,6	15,8	22,9	1,2	39,7

Nous adoptons l'utilisation de la section de ferrailage la plus importante, le choix des barres est le suivant :

Tableau IV-XIV : Diamètres adoptés pour le poteau 40 x 90.

Poteaux	Sections nécessaires (cm ²)		Choix du diamètre		Section réelle (cm ²)	
	As1	As2	3 HA 32	6 HA 32	24,13	48,25
40 x 90	20,0	44,8				

Après avoir déterminé la section d'armature (Figure IV-1), il est essentiel de s'assurer qu'elle satisfait à la condition de non-fragilité, conformément à l'article A.4.2.1 du BAEL 91.

$$A_{min} \geq 0,23 b. d. \frac{f_{t28}}{f_e}$$

A_{min} : Section armature longitudinale

f_e : Contrainte limite élastique.

f_{t28} : Résistance du béton à la traction à 28 jours.

b : Largeur de la section du poteau.

d : Hauteur utile de la section du poteau.

Tableau IV-XV : Vérification de la condition de non fragilité.

Poteaux	As (cm ²)	A_{min} (cm ²)	Observation
40 x 90	72,38	3,58	Vérifiée

IV.3.2.4 Calcul des armatures transversales

On détermine selon l'article 7.4.2.2 des règles parasismiques algériennes, les armatures transversales des poteaux :

Tableau IV-XVI : Détermination de la section transversale du poteau en zone nodale.

Section	V_u (KN)	ρ	h (cm)	f_e (MPa)	t (cm)	A_t (cm ²)	Barres
40 x 90	482,52	2,5	90	500	10	2,68	5 HA 12

Tableau IV-XVII : Détermination de la section transversale du poteau en zone courante.

Section	V_u (KN)	ρ	h (cm)	f_e (MPa)	t (cm)	A_t (cm ²)	Barres
40 x 90	482,52	2,5	90	500	20	5,36	5 HA 12

La vérification de l'effort tranchant se fait conformément à l'article 7.4.3.2RPA 99 / Version 2003 :

$$\tau_{max} \leq \tau_{bu}$$

$$\frac{T_{max}}{bd} \leq \rho_d f_{c28}$$

τ_{max} : Contrainte de cisaillement.

τ_{bu} : Contrainte limite de cisaillement du béton.

T_{max} : L'effort tranchant à l'état limite ultime.

b : Largeur de la section du poteau.

d : Hauteur utile de la section du poteau.

$$\rho_d = \begin{cases} 0,075 & \lambda \geq 5 \\ 0,040 & \lambda \leq 5 \end{cases}$$

f_{c28} : Résistance du béton à la traction à 28 jours.

Tableau IV-XVIII : Vérification au cisaillement.

Section	τ_{max} (MPa)	τ_{bu} (MPa)	Observation
40x90	0,15	2,25	Vérifiée

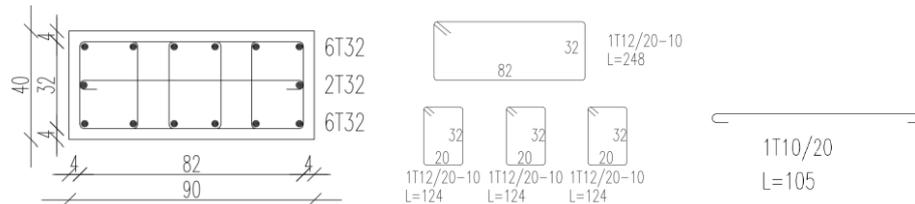


Figure IV-2 Schéma de ferrailage du poteau 40 x 90

IV.4 Ferrailage des poutres

Nous allons procéder au ferrailage de la poutre de section 30 x 55.

IV.4.1 Combinaisons de charges

Le calcul se fait sous l'action des sollicitations déterminées par les combinaisons réglementaires suivantes :

- ELU : 1.35 G + 1.5 Q
- ELU : 1.35 G + 1.5 Q ± T
- ELS : G+Q
- ELA : 0.8G + E
- ELA : G + Q + E

IV.4.2 Prescriptions Ferrailage des poutres

Le ferrailage des poutres a été réalisé en conformité avec les exigences définies par les normes parasismiques algériennes RPA99/Version 2003 données par l'article 7.5.2.1.

IV.4.2.1 Armatures longitudinales

- Le pourcentage total minimum des aciers longitudinaux sur toute la longueur de la poutre :

$$A_{min} = 0.5\%(b \times h)$$

- Le pourcentage total maximum des aciers longitudinaux est de :

$$\begin{cases} A_{\max} = 4\% (bxh) & \text{en zone courante} \\ A_{\max} = 6\% (bxh) & \text{en zone de recouvrement} \end{cases}$$

- La longueur minimale de recouvrement est de :

$$50\phi \quad \text{en zone III}$$

- L'ancrage des armatures longitudinales supérieures et inférieures dans les poteaux de rive et d'angle doit être respecté des crochets à 90°.
- Les cadres des nœuds disposés comme armatures transversales des poteaux, sont constitués de 2U superposés formant un carré ou un rectangle.
- Les directions du recouvrement de ces U doivent être alternés. Néanmoins, il faudra veiller à ce qu'au moins un côté fermé des U d'un cadre soit disposé de sorte à s'opposer à la poussée au vide des crochets droits des armatures longitudinales des poutres.
- On doit avoir un espacement maximum de 10cm entre deux cadres et un minimum de trois cadres par nœud.
-

IV.4.2.2 Armatures transversales

Selon l'article 1.5.1.2.3 CBA 93 :

- La quantité des armatures transversales est de :

$$\frac{A_t}{b_0 \cdot S_t} = \frac{\gamma_s(\tau_v - 0,3f_{tj} \cdot K)}{0,9f_e(\cos \alpha + \sin \alpha)}$$

D'après le CBA93, le diamètre des armatures transversales est donnée par :

$$\phi_t \leq \min \left\{ \frac{h}{35}; \frac{b}{10}; \phi_L \right\}$$

Selon l'article 7.5.2.2 RPA 99 / Version 2003 :

- L'espacement maximal entre les armatures transversales est déterminé comme suit :
 - Dans la zone nodale et en travée, si les armatures comprimées sont nécessaires :

$$\min \left(\frac{h}{4}; 12\phi \right)$$

- En dehors de la zone nodale l'espacement doit être :

$$s \leq \frac{h}{2}$$

- La valeur du diamètre des armatures longitudinales à prendre est le plus petit diamètre utilisé, et dans le cas d'une section en travée avec armatures comprimées, c'est le diamètre le plus petit des aciers comprimés.
- Les premières armatures transversales doivent être disposées à 5 cm au plus du nu de l'appui ou de l'encastrement.

IV.4.2.3 Calcul des armatures longitudinales

Nous commençons d'abord par la détermination des sollicitations de calcul. Les résultats sont obtenus à l'aide du logiciel ETABS 20, comme présenté ci-dessus

Tableau IV-XIX : Sollicitations de la poutre à l'ELU

ELU					
1.35G + 1.5Q			1.35G + 1.5Q + 0.8T		
M _t (KN.m)	M _a (KN.m)	T (KN)	M _t (KN.m)	M _a (KN.m)	T (KN)
293,5	-495,8	303,9	434,14	-534,3	305,2

Tableau IV-XX : Sollicitations de la poutre à l'ELA

ELA		
M _t (KN.m)	M _a (KN.m)	T (KN)
293,16	-452,1	253,68

Tableau IV-XXI : Sollicitations de la poutre à l'ELS

ELS		
M _t (KN.m)	M _a (KN.m)	T (KN)
214,3	- 362	221,66

Ensuite, nous passons à la détermination des armatures longitudinales. Nous commençons par déterminer la section minimale des aciers longitudinaux :

$$A_{min} = 0.5\%(b \times h)$$

Ainsi que les pourcentages maximums :

$$\begin{cases} A_{max} = 4\% (bxh) & \text{en zone courante} \\ A_{max} = 6\% (bxh) & \text{en zone de recouvrement} \end{cases}$$

Tableau IV-XXII : Sections d'armature minimale et maximale

Poutre	A_{min} (cm ²)	A_{max} (cm ²)	
		Zone courante	Zone de recouvrement
30 x 55	8,25	66	99

Ensuite, nous procédons à la détermination des dimensions des armatures longitudinales, réalisée à l'aide du logiciel Robot Expert.

	AS travée	AS appui
ELU	21,2	27,1
ELA	12,3	20,3

Tableau IV-XXIII : Choix des sections d'armature longitudinale.

Poutre	Sections nécessaires		Choix du diamètre		Section réelle	
	A_s travée (cm ²)	A_{sappui} (cm ²)	D Travée (mm)	D Appui (mm)	Travée (cm ²)	Appui (cm ²)
30 x 55	21,2	27,1	5 HA25	6 HA25	24,54	29,45

Après avoir déterminé la section d'armature (FigureIV-3-IV3), il est essentiel de s'assurer qu'elle satisfait à la condition de non-fragilité, conformément à l'article A.4.2.1 du BAEL 91.

$$A_{min} \geq 0,23 b. d. \frac{f_{t28}}{f_e}$$

Tableau IV-XXIV : Vérification de la condition de non fragilité.

Poutre	Section réelle (cm ²)		A_{min} (cm ²)	Observation
	Travée	Appui		
30x55	24,54	29,45	1,64	Vérifiée

IV.4.2.4 Calcul des armatures transversales :

On calcule d'abord l'espacement :

- Selon CBA 93 :

$$S_t \leq \min (0,9. d ; 40) \text{ cm}$$

- Selon RPA 99 :

$$\text{En zone nodale : } S_t \leq \min \left(\frac{h}{4} ; 12\phi \right)$$

$$\text{En zone courante : } S_t \leq \frac{h}{2}$$

On adopte :

- **En zone nodale :** $S_t = 10\text{cm}$.
- **En zone courante :** $S_t = 20\text{cm}$.

Tableau IV-XXV Calcul de la section d'armature transversale en zone nodale

Section	γ_s	τ_v (MPa)	f_{tj} (MPa)	K	f_e (MPa)	b_0 (cm)	S_t (cm)	A_t (cm ²)	Choix du diamètre
30x55	1	2,05	2,4	1	500	25	10	0,89	1 HA12 3 HA 10

Tableau IV-XXVI Calcul de la section d'armature transversale en zone courante

Section	γ_s	τ_v (MPa)	f_{tj} (MPa)	K	f_e (MPa)	b_0 (cm)	S_t (cm)	A_t (cm ²)	Choix du diamètre
30x55	1	2,05	2,4	1	500	25	20	1,77	1 HA12 3 HA 10

La vérification de l'effort tranchant se fait selon l'article A.5.1.2.1.1 CBA 93:

$$\tau_{max} \leq \bar{\tau}_u$$

$$\frac{T_{max}}{bd} \leq \min \left[\frac{0,2f_{c28}}{\gamma_b}; 4MPa \right]$$

τ_{max} : Contrainte de cisaillement.

τ_{bu} : Contrainte limite de cisaillement du béton.

T_{max} : L'effort tranchant à l'état limite ultime.

b : Largeur de la section du poteau.

d : Hauteur utile de la section du poteau.

f_{c28} : Résistance du béton à la traction à 28 jours.

γ_b : Coefficient de sécurité.

Tableau IV-XXVII : Vérification au cisaillement.

Poutre	τ_{max} (Mpa)	$\bar{\tau}_u$ (Mpa)	Observation
35 x 55	2,05	4	Vérifiée

• **Zone nodale :**

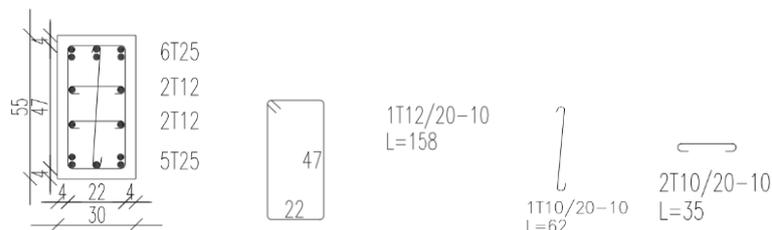


Figure IV-4 Schéma de ferrailage de la poutre 30 x 55 en zone nodale

- **Zone Courante :**

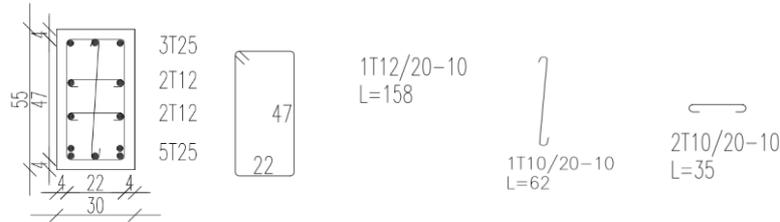


Figure IV-5 Schéma de ferrailage de la poutre 30 x 55 en zone courante

IV.5 Ferrailage des voiles

Un voile, est un élément de structure dont l'épaisseur à une dimension est largement inférieure aux deux autres, lesquelles se trouvent sur un même plan. Un voile s'étend sur un plan vertical et supporte des charges verticales et horizontales.

IV.5.1 Combinaisons de charges

Le calcul se fait sous l'action des sollicitations déterminées par les combinaisons réglementaires suivantes :

- ELU : 1.35 G + 1.5 Q
- ELU : 1.35 G + 1.5 Q ± T
- ELS : G+Q
- ELA : 0.8G + E
- ELA : G+Q+E

IV.5.2 Ferrailage

IV.5.2.1 Ferrailage verticale :

Le calcul des armatures des voiles sera fait par la **méthode des contraintes**. C'est une méthode simplifiée basée sur les contraintes. Elle admet de faire les calculs des contraintes en supposant un diagramme linéaire. On utilise la méthode des contraintes.

Les contraintes aux extrémités du voile sont déterminées, selon les hypothèses de la résistance des matériaux comme suit :

Pour l'extrémité gauche :

$$\sigma_g = \frac{N}{S} \pm \frac{M V}{I}$$

Pour l'extrémité droite :

$$\sigma_d = \frac{N}{S} \pm \frac{M V'}{I}$$

N : Effort normal appliqué .

M : Moment fléchissant appliqué .

S : Section transversale du voile .

V : Distance entre le centre de gravité du voile et la fibre la plus éloignée .

I : Moment d'inertie .

On trouve que la section soit :

- Entièrement comprimée lorsque :

$$\begin{cases} \sigma_g > 0 \\ \sigma_d > 0 \end{cases}$$

- Partiellement tendue lorsque :

$$\begin{cases} \sigma_g < 0 \\ \sigma_d > 0 \end{cases}$$

- Entièrement tendue lorsque :

$$\begin{cases} \sigma_g < 0 \\ \sigma_d < 0 \end{cases}$$

Pour le calcul de la section d'armatures :

- **Cas d'une section entièrement comprimée :**

La zone courante est armée par le minimum exigé par RPA99 :

$$A_{min} = 0,15\% \cdot e \cdot L$$

- **Cas d'une section entièrement tendue :**

On calcule le volume des contraintes de traction

$$F_t = (\sigma_1 + \sigma_2) \cdot \frac{L}{2} \cdot e$$

D'où la section des armatures verticales :

$$A_v = \frac{F_t}{6_s}$$

- **Cas d'une section partiellement tendue :**

$$F_t = \frac{1}{2} \cdot \sigma_2 \cdot L_t \cdot e$$

D'où la section des armatures verticales :

$$A_v = \frac{F_t}{6_s}$$

IV.5.2.2 Ferrailage horizontale

1. Vérification des voiles à l'effort tranchant :

La vérification de la résistance des voiles au cisaillement se fait avec la valeur de l'effort tranchant trouvé à la base du voile, majoré de 40% (article 7.7.2 des RPA99/V2003) .La contrainte de cisaillement est :

$$\tau_u = 1,4 \frac{T}{e d}$$

T : Effort tranchant à la base du voile.

e : épaisseur du voile.

d : Hauteur utile. $d=0,9h$

D'après l'article (7.7.2 des RPA99/V2003) ; la contrainte limite est :

$$\bar{\tau}_u = 0,2f_{c28}$$

Il faut vérifier la condition suivante :

$$\tau_u \leq \bar{\tau}_u$$

2. Calcul du ferrailage horizontal :

D'après l'article (A.5.1.2.3 de CBA93) la section A_t des armatures d'*âmes* est donnée par la relation suivante :

$$\frac{A_t}{e S_t} \geq \frac{\gamma_s(\tau_u - 0,3f_{tj} K)}{0,9f_e}$$

- **K=0** : dans le cas d'une fissuration très préjudiciable ; ou dans le cas de bétonnage non munie d'indentations la surface de reprise.
- **K=1** : en flexion simple ; sans reprise de bétonnage.
- **K=1 + $\frac{3\sigma_{cm}}{f_{c28}}$** : en flexion composée avec N, effort de compression.
- **K=1 - $\frac{10\sigma_{tm}}{f_{c28}}$** : en flexion composée avec N, effort de traction.

σ_{cm}, σ_{tm} : étant la contrainte moyenne de traction et de compression obtenus en divisant l'effort normal de calcul par la section du béton.

Les prescriptions communes relatives au ferrailage des voiles sont disponibles en Annexe D.

Application :

Calcul de ferrailage vertical :

- Caractéristiques géométriques :

$$L = 120\text{cm}$$

$$e = 30\text{ cm.}$$

- Sollicitations :

$$N = -2269,99\text{ KN}$$

$$M = -10,56\text{ KN.m}$$

- Contraintes :

$$\sigma_1 = \frac{N}{S} + \frac{M V}{I} = -4,87\text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = \frac{N}{S} - \frac{M V}{I} = -7,75\text{ MPa}$$

- Section de la zone tendue :

Longueur de la zone tendue : $L_t = 120\text{cm}$

Effort de traction : $F = 2269.95\text{ KN.}$

$$A_s = 46,26\text{ cm}^2$$

- Section d'acier minimale dans la zone tendue d'après le RPA99 / Version 2003 :
Sur toute la section du voile $A_s = 5,4\text{ cm}^2$.

- Diamètres adoptés :

Le diamètre adopté est : 24 HA 16 (Figure IV-6).

- Espacement :

Selon l'article 7.7.4.3 du RPA version 2003 : $St \leq (1,5 e ; 30)\text{ cm.}$

Dans la zone courante : $St = 20\text{cm.}$

Dans la zone d'about $Sa = \frac{St}{2} = 10\text{cm.}$

Calcul du ferrailage horizontal :

- Vérification de l'effort tranchant :

Il faut vérifier la condition suivante :

$$\tau_u \leq \bar{\tau}_u$$

$$T = 183,01\text{ KN}$$

$$\tau_u = 0,010\text{ MPa}$$

$$\bar{\tau}_u = 6\text{ MPa}$$

$$\tau_u \leq \bar{\tau}_u \rightarrow \text{Vérifiée}$$

- Escapement:

Selon l'article 7.7.4.3 du RPA version 2003 : $St \leq (1,5 e ; 30) \text{ cm}$

$St = 10 \text{ cm}$

- Calcul de la section d'armatures :

$$A_t \geq 1,54 \text{ cm}^2$$

- Section d'acier minimale dans la zone tendue d'après le RPA99 / Version 2003 :

Pour $\tau_u \leq 0,025 f_{c28}$: $A_{t \text{ min}} \geq 0,0015 b_0 S_t$

$$A_{t \text{ min}} \geq 0,45 \text{ cm}^2$$

- Diamètres adoptés :

Le diamètre adopté est : 6 T10

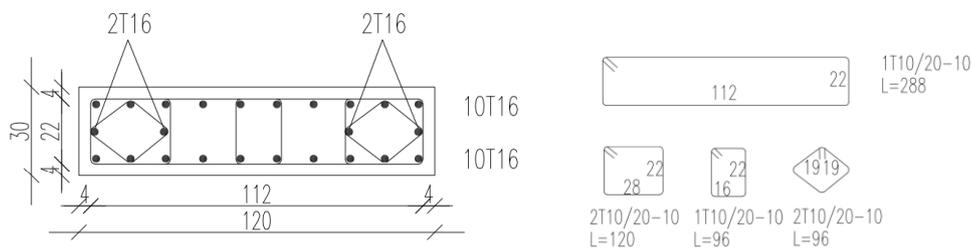


Figure IV-7 Schéma de ferrailage du voile 30 x 120

IV.6 Ferrailage des dalles

Les dalles sont des éléments plans d'épaisseur faible par rapport aux autres dimensions, supposés infiniment rigides dans leur plan, reposant avec ou sans continuité sur deux, trois ou quatre appuis.

IV.6.1 Caractéristiques géométriques

Le projet a été élaboré avec des planchers en dalles pleines articulées sur leur contour. Dans cette structure les dalles sont articulées sur leur contour avec :

Tableau IV-XXVIII : Dimension de la dalle.

Dimensionne	l_x (m)	l_y (m)	e (cm)
Valeur	7,93	8,22	20

Avec :

l_x : Largeur totale.

l_y : Longueur totale.

e : Épaisseur de de la dalle.

IV.6.2 Combinaisons de charges

Comme pour les charges permanentes et les charges d'exploitation, les combinaisons de charges ont également été abordées dans le chapitre deux. Le tableau suivant les résume :

Tableau IV-XXIX : Sollicitations de calcul de la dalle.

Plancher	G (KN)	Q (KN)	ELU	ELS
RDC	8,5	3,5	16,725	12

IV.6.3 Direction de la dalle

Afin de déterminer la direction de la dalle, nous définissons d'abord les portées mesurées entre nus d'appuis, notées l_x et l_y , telles que la valeur de l_x doit être inférieur à celle de l_y . Ensuite, nous définissons un coefficient α comme suite :

$$\alpha = \frac{l_x}{l_y} \leq 1$$

Dans notre cas d'étude nous avons :

$$\alpha = \frac{L_x}{L_y} = \frac{793}{822} = 0,96 > 0,4$$

→ Donc la dalle travaille dans les deux sens

IV.6.4 Déterminer les moments réels de calcul

Afin de déterminer les moments réels de calcul, il faut tout d'abord déterminer les moments de la dalle articulée à l'état limite ultime en utilisant les coefficients de moment μ_x et μ_y , que l'on trouvera dans le tableau des BARRES :

Tableau IV-XXX : Tableau de BARRES

$\alpha = \frac{l_x}{l_y}$	$v = 0$	
	$\mu_x = M_{ox}/ql_x^2$	$\mu_x = M_{oy}/M_{ox}$
0,95	0,041	0,887
1,00	0,037	1,000

Après avoir déterminé les coefficients μ_x et μ_y , nous pouvons déduire les valeurs des moments de la dalle articulée comme suit :

- Dans le sens de la petite portée :

$$M_{0x} = \mu_x q_u L_x^2 = 43,12 \text{ KN.m}$$

- Dans le sens de la grande portée :

$$M_{0y} = \mu_y M_x = 38,24 \text{ KN.m}$$

Ensuite nous passons à la détermination des moments réels de calcul M_x et M_y , qui sont calculées à partir des valeurs des moments de la dalle articulée M_{0x} et M_{0y} :

Pour les moments en travées :

$$M_{tx} = 0,85 M_{0x}$$

$$M_{ty} = 0,85 M_{0y}$$

Pour les moments sur appuis :

$$M_{ax} = 0,5 M_{0x}$$

$$M_{ay} = 0,5 M_{0y}$$

Les résultats de calculs sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau IV-XXXI : détermination des moments réels de calcul

	M_{tx} (KN.m)	M_{ax} (KN.m)	M_{ty} (KN.m)	M_{ay} (KN.m)
ELU	36,652	21,56	32,50	19,12

Le tableau suivant donne les résultats de ferrailage à l'ELU données par le programme Robot Expert 10 :

Tableau IV-XXXII : résultats de ferrailage à l'ELU.

Section	A_s (cm ²)	A_s' (cm ²)
Travée	5,1	0
Appuis	0	2,9

On adopte dans les deux sens :

- En travée : 7 HA10 = 5,50 cm² /ml espacés de 15cm.
- En appui : 7 HA10 = 5,50 cm² /ml espacés de 15cm (Figure IV-8).

• **Condition de non fragilité :**

b=100cm.
e=20cm.

$$A_{s_x}^{\min} \geq \rho_o \frac{3 - \frac{\ell_x}{\ell_y}}{2} bh$$

$$A_{s_y}^{\min} \geq \rho_o bh$$

Avec :

$$\rho_o = 0,0008 \text{ pour les HA}$$

En travée et en appuis :

Sens x-x : $A_s = 5,50 \text{ cm}^2 \geq 1,64 \text{ cm}^2 \rightarrow$ Vérifiée

Sens y-y : $A_s = 5,50 \text{ cm}^2 \geq 1,6 \text{ cm}^2 \rightarrow$ Vérifiée

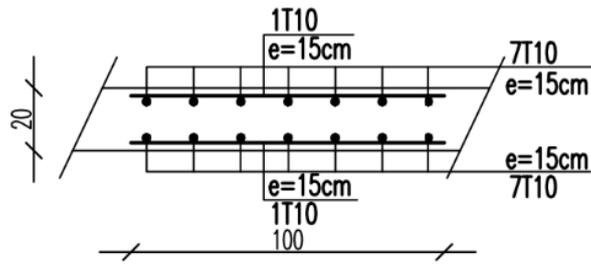


Figure IV-9 Schéma de ferrailage de la dalle d'épaisseur 20cm

IV.7 Conclusion

Suite à une analyse des composants de la superstructure, nous sommes parvenus à la conclusion que ces éléments respectent pleinement les exigences du règlement parasismique algérien en vigueur. En prenant en considération l'effet de la température sur les éléments extérieurs, nous avons observé qu'il induit une augmentation des efforts internes. Nous avons également sélectionné un élément de chaque type d'élément structural afin de réaliser son ferrailage adoptant ainsi de sections d'armatures longitudinales et transversales appropriées, ainsi que la réalisation des vérifications requises conformément aux normes en vigueur.

V. Création de la Maquette Numérique

V.1 Introduction

Avec la révolution numérique, les maquettes numériques sont actuellement au cœur de tous les métiers, ingénierie, maîtrise d'ouvrage, modélisation, gestion de patrimoine. Elle peut être utilisée durant tout le cycle de vie du bâtiment.

La maquette numérique peut être utilisée durant les différentes phases d'un projet, phase d'étude technique, conception, exploitation, déconstruction, et de démolition. De ce fait, elle peut être utile pour chaque acteur. Elle facilite la méthode de travail des différents intervenants du projet de construction.

V.2 La maquette numérique

V.3 Définition

La maquette BIM contient une représentation 3D, correspondant à un ensemble d'objets 3D qui forme le projet du bâtiment. Un objet est une représentation numérique précise du produit physique, modélisé en 3D. Ces objets ont chacun un nom, une forme et un matériau. En plus des informations géométriques, ils peuvent avoir également les caractéristiques techniques comme les provenances ou les fiches techniques.

Quelques exemples d'informations contenues dans une maquette BIM :

- **Composition** : nature des matériaux composant l'objet modélisé.
- **Propriétés** : résistance thermique, performances acoustiques, etc...
- **Localisation** : nom de la pièce, des bâtiments, coordonnées de l'objet.
- **Sémantiques** : description de l'objet, fiches techniques, liens vers le site du fabricant.
- **Quantitatives** : volumes, surfaces, longueurs et toutes autres quantités associées aux constituants de l'objet dessiné.
- **Métiers** : définition de la nature porteuse ou non des matériaux employés et gestion des jonctions mécaniques entre les éléments par attribution de priorités de raccordement.

V.4 Différence entre modélisation géométrique et modélisation objet

La différence entre les logiciels de CAO 2D et ceux de maquette numérique est que nous dessinons avec des objets. Par exemple, pour dessiner un mur, nous allons travailler avec un objet mur. Cet objet est intelligent et comporte des informations sur sa hauteur, sa composition, ses contraintes, ses résistances thermiques et acoustique.

Dans un logiciel de 2D traditionnel, ces informations ne sont pas prises en compte. De ce

fait, dès qu'il y a une modification sur le projet, il est nécessaire de tout redessiner. A l'inverse, la maquette numérique intègre ces données.

V.5 Présentation logiciel Revit

Le logiciel Revit d'Autodesk est un outil de conception et de dessin pour la modélisation des données du bâtiment (BIM) destiné aux architectes et ingénieurs.

Le logiciel Revit dispose d'une suite d'outils conçus pour la conception architecturale, l'ingénierie structurelle, mécanique et électrique. Il permet de modéliser, d'analyser et de simuler les projets de construction et infinie de créer la documentation.

Autodesk Revit prend également en charge la coordination de modèles pluridisciplinaires grâce à son mode collaboratif et son interopérabilité avec les autres logiciels. Le logiciel Revit permet ainsi de créer efficacement des maquettes numériques.

V.6 Principe des composants paramétriques de REVIT

Sur Revit, il existe une certaine hiérarchie des propriétés des composants : les objets de construction sont classés en catégories, familles, types et occurrences (Figure V-1).

- **Les catégories** : ils sont les classifications des objets de construction : mur, poteau, poutre, sol, escalier, porte, fenêtre, plafond, toit, ... Chaque catégorie dispose d'un gabarit de famille associé.
- **Les familles** : ils sont des classes d'objets d'une catégorie. Chaque famille regroupe les objets dotés d'un ensemble de propriétés communes et d'une représentation graphique associée.
- **Les types** : ils sont les déclinaisons d'une famille en fonction des propriétés de famille, appelées les paramètres de type de famille. Un type peut correspondre à un rôle, à un matériau, ou bien à des caractéristiques géométriques déterminées par l'utilisateur.
- **Les occurrences** : ils correspondent à des objets uniques, insérés dans le projet et situés à un emplacement donné du bâtiment.

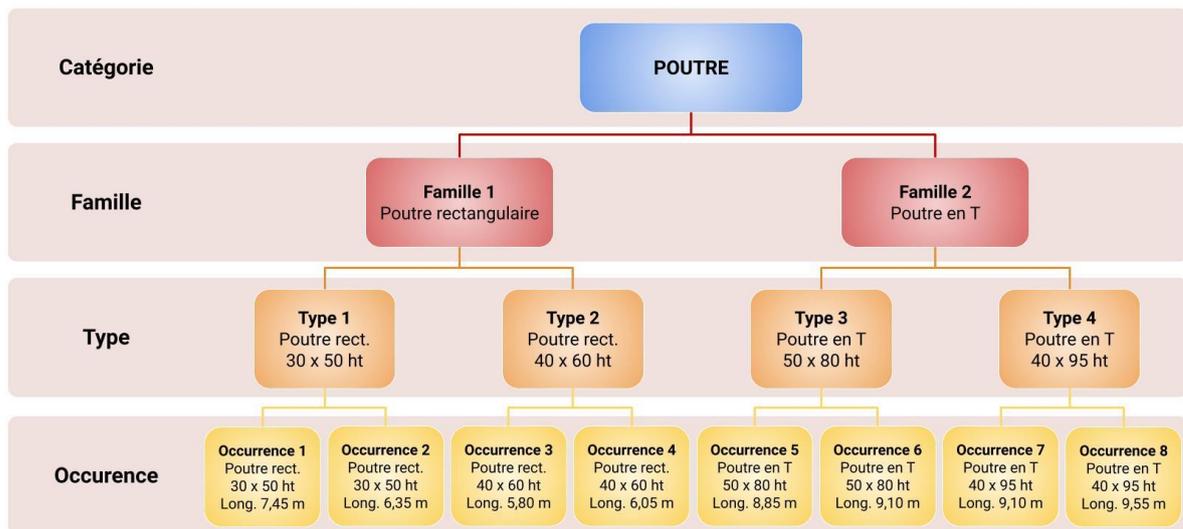


Figure V-2 Hiérarchie d'objets Revit Autodesk

V.7 Étapes de création de la maquette numérique

Les étapes de création de la maquette numérique sont les suivantes :

- La collecte des données :

La première étape consiste à collecter les données qui seront utilisées dans le modèle 3D. Il peut s'agir de dessins d'architecture, de fichiers CAO et d'autres documents numériques liés au projet.

Pour notre projet, nous disposons de plans architecturaux et de structure réalisés avec le logiciel AutoCAD d'Autodesk.

- La création de Gabarit :

Un Gabarit est un fichier Revit qui contrôle les conditions de démarrage de tout nouveau projet dans Revit. Il peut englober toutes les fonctionnalités de création offertes par Revit.

Par exemple, les vues, les familles, les styles d'écritures (textes et cotations), les symboles permettant de repérer une coupe, un détail, un niveau, les matériaux...

Les Gabarit ont également leurs propres extensions de fichier pour les distinguer des projets Revit standard, RTE.

Lorsque on démarre un projet à l'aide d'un Gabarit, Revit crée un nouveau projet Revit et n'écrase pas le Gabarit, mais demande de créer un nouveau fichier de projet Revit avec une extension RVT.

Les gabarits de projet Revit Structure permettent de définir les éléments suivants :

-Informations sur le projet. Ces informations peuvent inclure le nom du projet, le numéro de projet, le nom du client, etc.

-Paramètres du projet. Par exemple le style de ligne des composants et des lignes, les motifs de remplissage des matériaux, les unités du projet, les incréments d'accrochage des vues de modèle, etc.

-Vues de projet. Nous pouvons prédéfinir les vues en plan, les niveaux, les nomenclatures, les légendes, les feuilles, etc.

-Paramètres de visibilité et de graphismes.

Notre utilisation du gabarit REVIT s'est principalement concentrée sur trois aspects :

- Création des familles.
- Représentation des matériaux.
- Création d'un gabarit de vue.

- **Le quadrillage :**

Pour la mise en place d'un quadrillage dans l'environnement de modélisation Revit, la procédure s'articule comme suit :

- **Importation du fichier CAO :** Pour initier le processus, il convient d'importer le fichier CAO. Cela s'accomplit en accédant à l'onglet "Insérer" et en sélectionnant le groupe de fonctions dédié à l'importation, l'option "*Importer CAO*".
- **Verrouillage du fond de plan :** Une fois le fond de plan correctement intégré dans l'interface Revit, il est impératif de le verrouiller afin de prévenir toute modification involontaire.
- **Tracé du quadrillage :** Sous l'onglet "Structure", au sein du groupe de fonctions "*Référence*", l'outil approprié pour la création du quadrillage est l'outil "*Segments Multiples*".

- **Les niveaux d'étages :**

La définition précise des niveaux d'étages dans une maquette numérique est essentielle pour assurer une représentation cohérente et précise du projet. Ces niveaux servent de références, simplifiant la navigation et la gestion des éléments du projet.

- **La modélisation :**

Il s'agit de modéliser les poteaux, les voiles, les poutres, les ouvertures et les dalles. En affectant des attributs et des relations à chaque objet afin de représenter avec précision les caractéristiques physiques du bâtiment (Figure V-3).

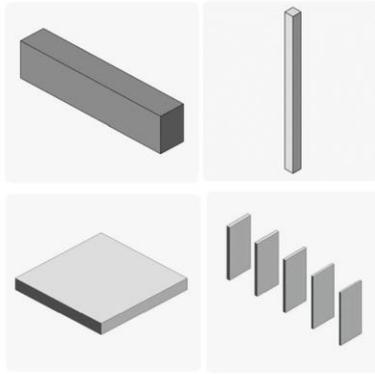


Figure V-4 Objets structure sur Revit Autodesk.

- **La vérification :**

L'étape finale consiste à analyser et à valider le modèle. Il est important de vérifier que le modèle soit correct et qu'aucune erreur n'est présente avant de le finaliser.

V.8 Le modèle physique et le modèle analytique :

Lorsque que l'on dessine un objet dans Revit on crée 2 modèles simultanément : un modèle physique et un modèle analytique (Figure V-5).

- **Le modèle physique :**

C'est le modèle qui ressemble le plus à la structure tridimensionnelle à réaliser. C'est celui sur lequel on s'appuie pour vérifier la cohérence graphique de la structure. Il représente le coffrage de la structure (voiles, poteaux, poutres, dalles...).

- **Le modèle analytique :**

Le modèle analytique dans Revit est une représentation simplifiée des éléments structuraux d'un bâtiment (sous forme de barres / coques) qui est spécifiquement conçue pour faciliter les analyses structurelles.

Ce modèle analytique est destiné à être exporté vers des logiciels spécialisés tels que ROBOT ou ETABS, afin de procéder à des analyses structurelles.

Chaque objet possède des propriétés physiques mais possède également des propriétés analytiques.

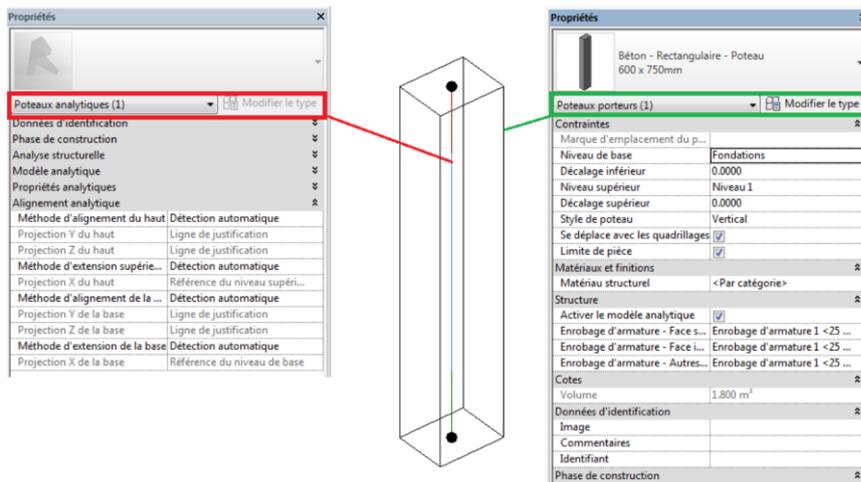


Figure V-6 La double représentation d'un poteau sur Revit

V.9 Limitations du modèle analytique

Quelques éléments du modèle analytique engendrés par le processus d'automatisation analytique (*Automatisation physique à analyse*) de Revit 2023, présentent une absence de liaison ou d'alignement (Figure V-7). Ces éléments peuvent perturber le maillage des éléments dans un modèle de calcul.

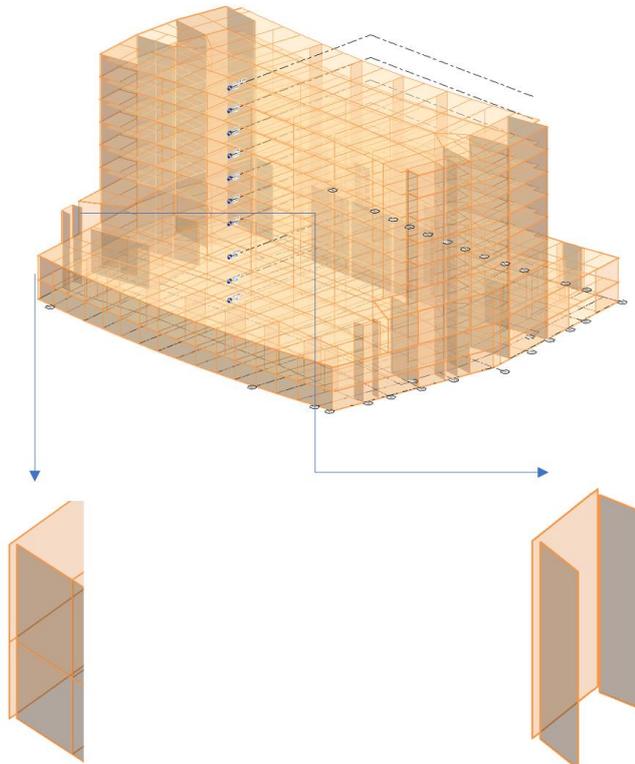


Figure V-8 Discontinuités du modèle analytique

Les difficultés de continuité et de connexion sont récurrentes quand on essaye de créer un modèle analytique à partir d'un modèle physique. La possibilité de modifier la position des éléments analytiques va nous permettre de corriger ces nombreux

problèmes. Cependant, la modification manuelle de chacun d'eux peut s'avérer longue, sans permettre d'avoir l'assurance d'un modèle global cohérent et surtout performant.

V.10 Correction du modèle analytique

La correction du modèle analytique peut être réalisée de deux manières :

- Correction manuelle du modèle analytique dans Revit 2023 (Figure V-9).
- Correction du modèle analytique après l'exportation du modèle dans le logiciel d'analyse structurelle.

Le groupe de commandes *Modifier le modèle analytique* s'ouvre directement lorsque on sélectionne un élément dans la *3D analytique*.

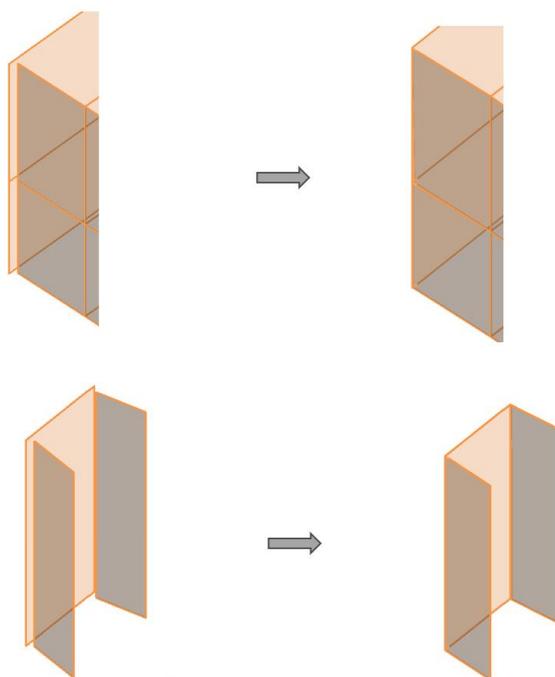


Figure V-10 Réglage du mur par rapport à un autre mur sur Revit

V.11 Interopérabilité Revit et logiciels EF

Les échanges de données entre les différents logiciels rencontrent malheureusement des difficultés dans la pratique, principalement en raison de l'hétérogénéité des langages informatiques des outils informatiques. Mais également en raison de l'environnement fragmenté des différents acteurs (normes, techniques, méthodes).

Nous explorons deux approches dans le cadre de notre analyse des méthodes de transfert de données :

- La première méthode se focalise sur le transfert de données depuis le logiciel d'analyse structurelle *ETABS* vers le logiciel de modélisation *Revit*.
- La seconde méthode se concentre sur le transfert de données à partir du logiciel de modélisation *Revit* vers le logiciel d'analyse structurelle *Robot Analysis*.

V.11.1 Interopérabilité ETABS REVIT

Nous examinerons le transfert de données depuis le logiciel d'analyse structurelle ETABS vers le logiciel de modélisation Revit, par l'intermédiaire de l'outil CSiXRevit.

V.11.1.1 Présentation de l'extension CSiXRevit

Un lien direct entre Revit et ETABS est disponible grâce à un plug-in appelé CSiXRevit.

CSiXRevit est une extension (plugin) conçue pour Autodesk Revit qui permet le transfert bidirectionnel de données vers les produits logiciels de CSI : SAP2000, ETABS et SAFE permettant :

- Exporter depuis Revit pour créer un nouveau modèle logiciel CSI.
- Exporter depuis Revit pour mettre à jour un modèle logiciel CSI existant.
- Importer depuis le logiciel CSI pour créer un nouveau modèle Revit.
- Importer depuis le logiciel CSI pour mettre à jour un modèle Revit existant.

L'échange de données entre ETABS et Revit s'effectue par l'intermédiaire du fichier '.exr'. ETABS permet l'importation et l'exportation de ce fichier via son menu *Fichier*.

Revit permet l'importation et l'exportation de ce fichier via son menu *Compléments*.

La création du lien commence par l'activation ou la désactivation de l'exportation des composants suivants : les grilles, les cadres, les charges ponctuelles, les charges linéaires et les combinaisons de charges. Selon ce qui est modélisé dans le projet.

V.11.1.2 Transfert de données ETABS REVIT

Nous notons que la maquette a été générée à partir du modèle précédemment créé sur ETABS (Figure V-11), et que les éléments de structure ont été exportés avec un niveau de précision différent.

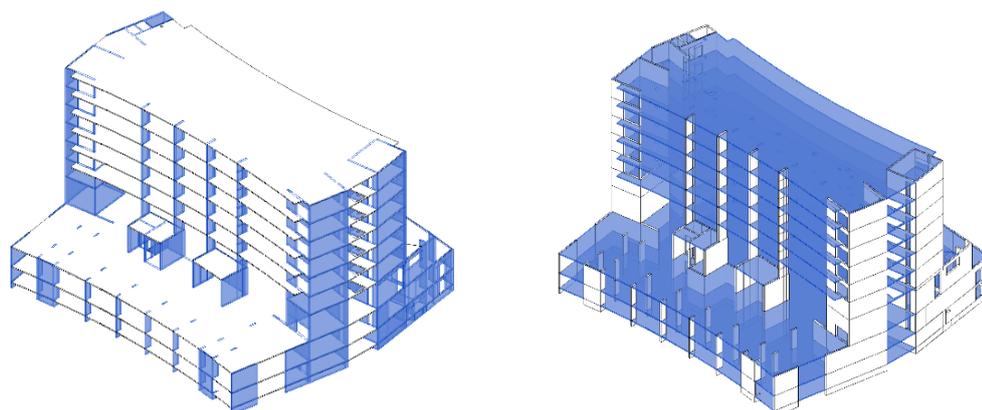


Figure V-12 Maquette Revit structure générée à partir du modèle ETABS

- Les voiles ont été principalement générés de manière appropriée. Cependant, nous remarquons quelques discontinuités et certains éléments manquants (Figure V-13).

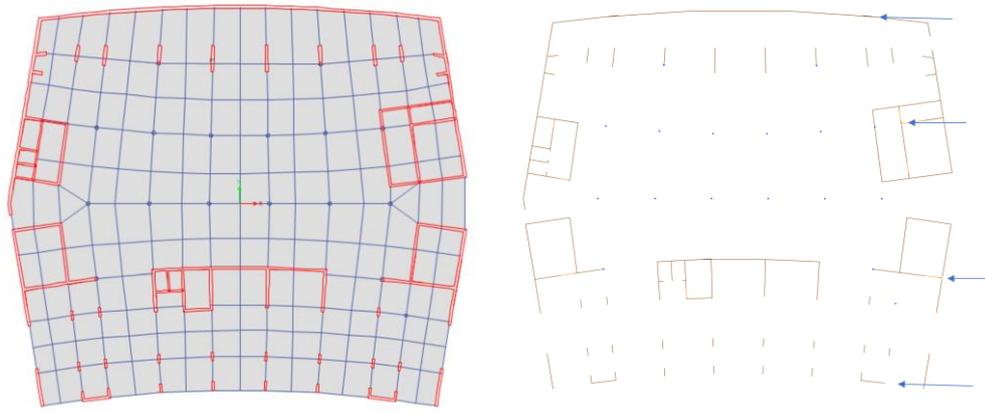


Figure V-14 Génération des éléments voiles sur Revit

- Les dalles ont été créées, cependant, il est remarqué que les ouvertures n'ont pas été toutes intégrées (Figure V-15).

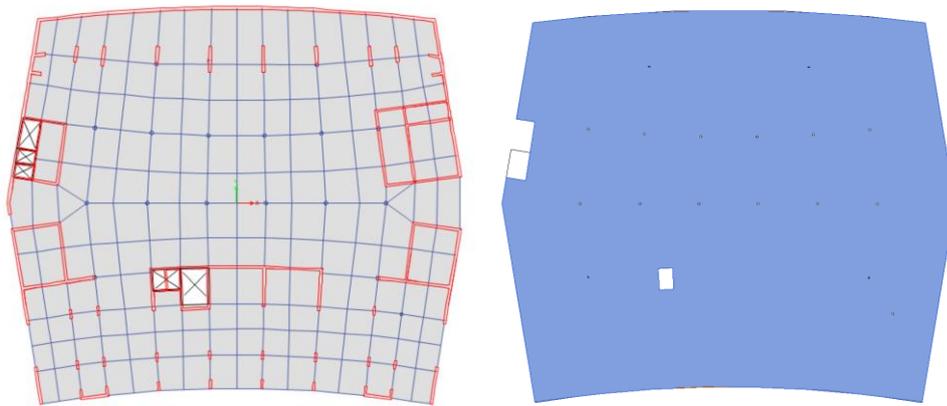


Figure V-16 Génération des éléments dalles sur Revit

- Les poutres ont été générées avec plusieurs erreurs. Nous observons des chevauchements entre certains éléments poutres, des discontinuités avec d'autres éléments voiles, ainsi qu'un décalage de certaines poutres par rapport à leur emplacement initial et l'absence de quelques éléments poutres (Figure V-17).

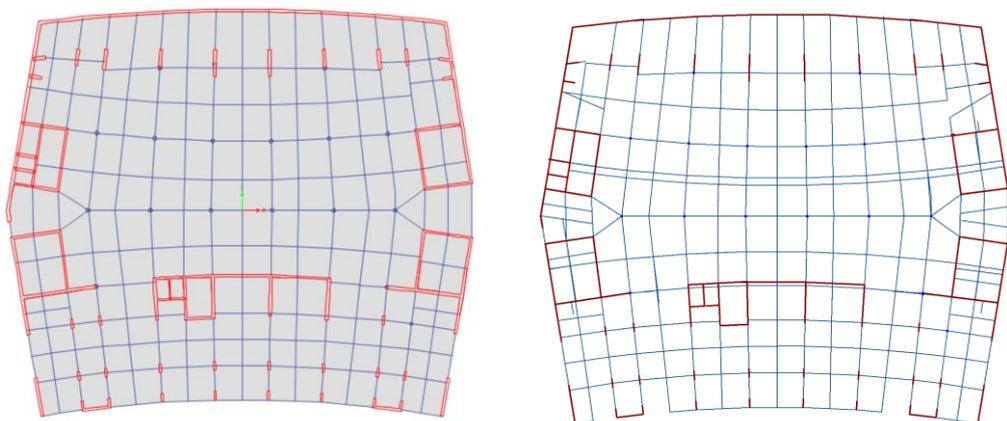


Figure V-18 Génération des éléments poutres sur Revit

- Les poteaux circulaires ont été générés à leurs emplacements corrects. Cependant, les poteaux rectangulaires n'ont pas été reconnus et ont été convertis en poteaux circulaires (Figure V-19).

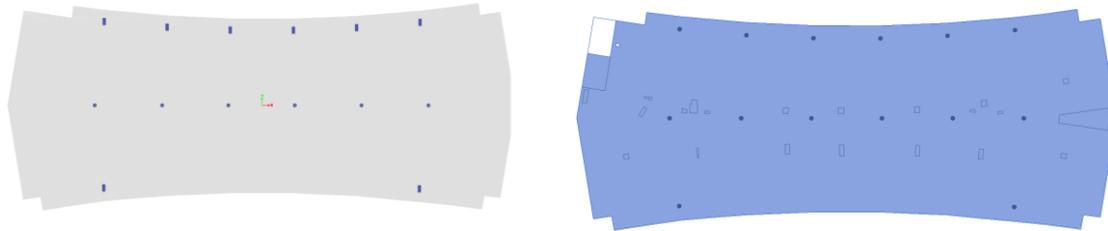


Figure V-20 Génération des éléments poteaux sur Revit

V.11.2 Interopérabilité REVIT RSA

Nous examinerons le transfert de données à partir du logiciel de modélisation *Revit* vers le logiciel d'analyse structurelle *Robot Analysis*.

V.11.2.1 Présentation du logiciel Robot Structural Analysis

Robot Structural Analysis est un logiciel destiné à modéliser, analyser et dimensionner les différents types de structures. Robot Structural Analysis permet de modéliser les structures, les calculer, vérifier les résultats obtenus, dimensionner les éléments spécifiques de la structure. Robot Structural Analysis permet également la création de la documentation pour la structure calculée et dimensionnée.

V.11.2.2 Présentation du lien Revit RSA

Le modèle structurel Revit combine une représentation physique de la structure avec une représentation analytique. Le lien bidirectionnel entre Revit et Robot permet à ce modèle commun d'être utilisé pour l'analyse et la conception structurelle, la production de dessins et la coordination de projet.

Il existe deux méthodes pour le transfert de données entre Revit et Robot Structural Analysis :

- L'intégration directe.
- L'utilisation d'un fichier intermédiaire (.smxx).

L'option d'intégration directe entraîne le transfert automatique du modèle de Revit vers Robot, suivi du lancement du logiciel Robot. L'option d'utilisation d'un fichier intermédiaire implique un transfert de données du modèle Revit vers Robot via un fichier (.smxx).

Lorsque on transfère un modèle vers Robot Structural Analysis, nous avons plusieurs options. Il est possible choisir d'envoyer l'intégralité du modèle ou seulement une partie spécifique (Figure V-21), ce qui s'avère pratique lors de l'analyse et de la conception de certains éléments ou systèmes structuraux, ou lors de petites modifications dans la disposition ou la conception.

Les options pour mettre à jour un modèle Revit à partir de Robot Structural Analysis sont similaires aux options pour envoyer un modèle.

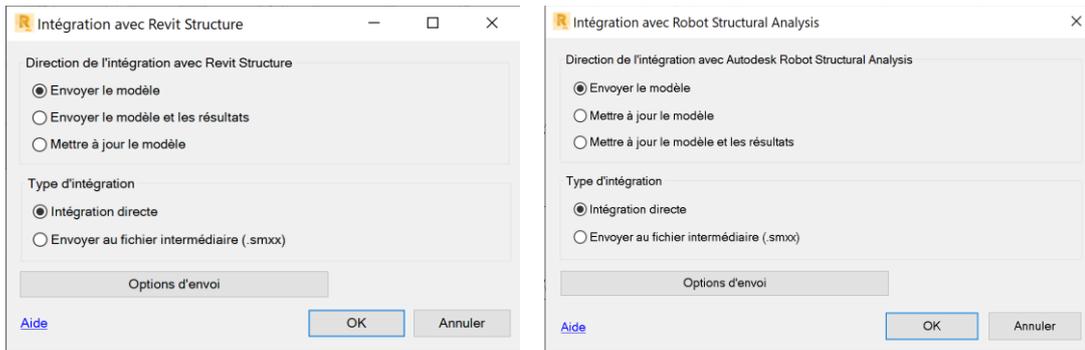


Figure V-22 Intégration directe Revit Robot Structural Analysis

V.11.2.3 Transfert de données

La version de Robot Structural Analysis utilisée est la version 2019. Afin de faciliter le transfert de données entre les logiciels, il faut utiliser la version correspondante de Revit, à savoir Revit 2019.

Revit ne propose pas de fonctionnalité permettant d'enregistrer dans des formats de données de versions antérieures ou de travailler avec un format de fichier RVT plus récent dans une version antérieure.

Pour réaliser l'ouverture du fichier dans une version antérieure du logiciel, il est recommandé d'exporter le fichier de la version récente au format IFC (Industry Foundation Classes), puis de l'importer dans la version antérieure du logiciel (Figure V-23).

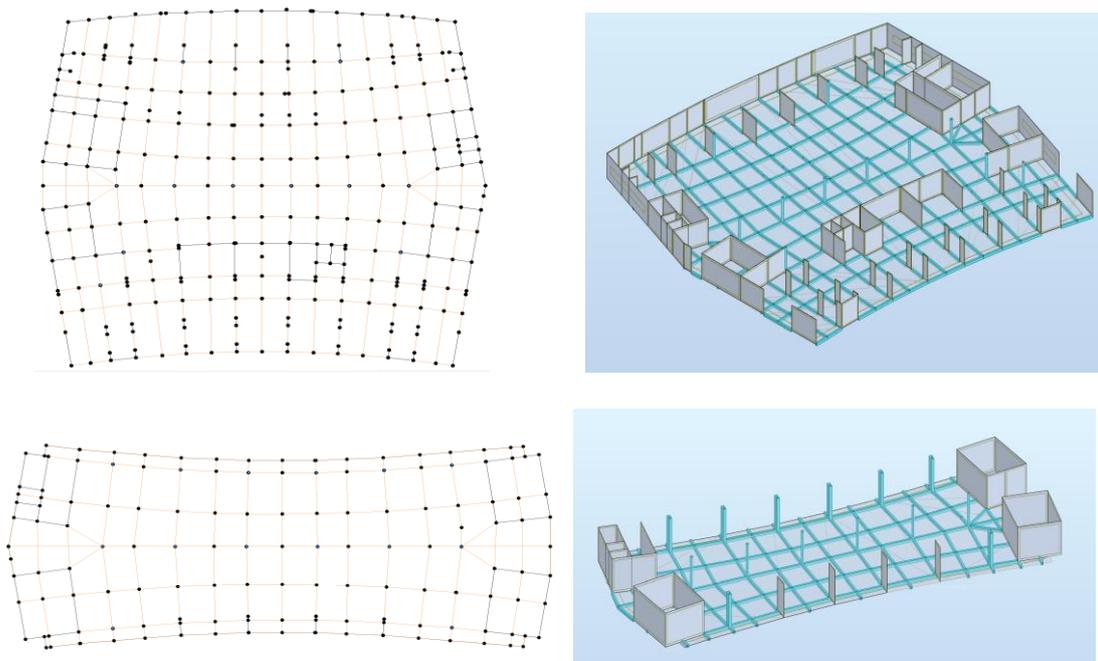


Figure V-24 Transfert de données entre Revit et Robot Structural Analysis

Il est observé que les éléments structuraux, tels que les poutres, les poteaux, les dalles et les voiles, ont été générés de manière adéquate dans le logiciel Robot Structural Analysis à partir de Revit, sans présenter de décalage. Toutefois, il est essentiel de souligner qu'une vérification minutieuse des nœuds sur Revit est nécessaire, et que des ajustements ont été apportés aux nœuds avant l'envoi du fichier vers Robot Structural Analysis (Figure V-25).

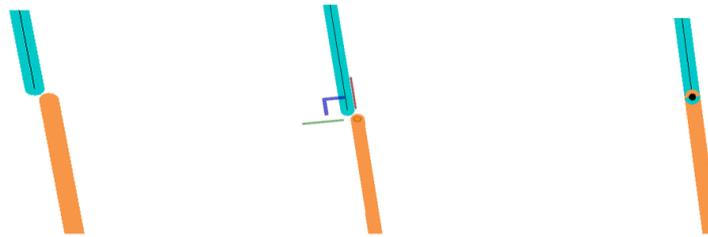


Figure V-26 Ajustement des nœuds sur Revit

Pour pouvoir effectuer une analyse dans le logiciel EF, il est impératif que le modèle analytique soit préparé de manière adéquate sur Revit. Sinon des ajustements doivent être apportés dans le logiciel EF.

La possibilité de modifier la position des éléments analytiques sur Revit va nous permettre de corriger ces nombreux problèmes de liaison de nœuds. Néanmoins, la manipulation manuelle de chacun de ces éléments peut demander un temps considérable. Il est toutefois notable que la correction des modèles aux formes régulières peut généralement être réalisée avec aisance comparativement aux modèles irréguliers. Certains éléments ou paramètres, tels que les conditions aux limites, les charges et les combinaisons de charges, peuvent être plus facilement modélisés et ajustés sur Robot Structural Analysis.

L'interopérabilité entre les logiciels Revit et Robot Structural Analysis, développés par le même éditeur, confère un avantage significatif, favorisant ainsi l'optimisation des performances. Cela repose sur un échange itératif de données qui préserve intégralement les informations dans les deux logiciels.

V.12 Exploitation de la maquette numérique

V.12.1 Meilleure visualisation :

Le modèle 3D est très utile pour tous les travaux de visualisation. Les rendus servent à tous les membres de l'équipe pour mieux comprendre l'intention du projet et pouvoir ainsi émettre plus facilement des observations. Que ce soit pour les concepteurs, les travailleurs du chantier ou les maîtres d'ouvrages, l'utilisation de la modélisation numérique offre une meilleure visualisation du bâtiment et une compréhension plus approfondie du projet. La qualité et le type de rendu peuvent varier du dessin de type croquis jusqu'à une image hyperréaliste avec des matériaux précis (Figure V-27).

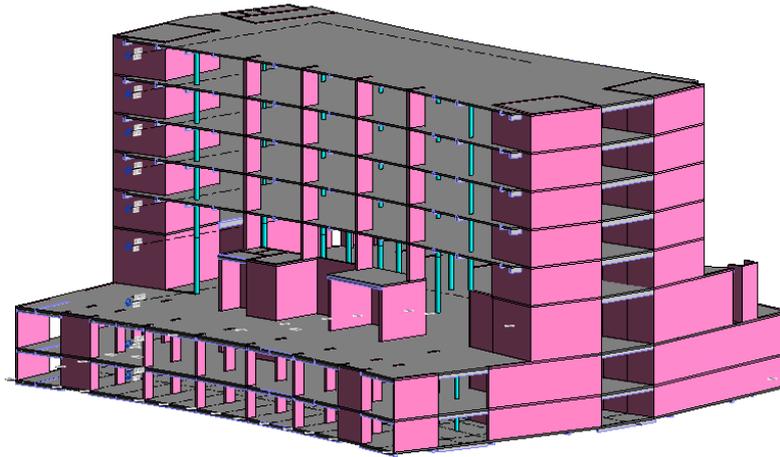


Figure V-28 Vue 3D de la maquette numérique

En maîtrise d'ouvrage, la maquette numérique sert essentiellement comme support de communication qui permet de mieux présenter le projet et de convaincre de l'intérêt du projet pour des gens qui n'ont pas l'habitude de lire sur des plans. De plus, cette maquette numérique peut être conservée comme outil de visualisation après la construction du bâtiment, ce qui s'avère très utile pour faciliter d'éventuels travaux de rénovation futurs, par exemple.

V.12.2 Réalisation des plans de coffrage et de ferrailage :

A travers les paramétrages nécessaires, on peut extraire les plans de coffrage et de ferrailage des différents éléments et des différents niveaux.

- **Plans de coffrage :**

Le logiciel Revit d'Autodesk permet de produire automatiquement les vues en plan, les coupes ou sections locales, les élévations et les vues isométriques.

Pour finaliser rapidement les dessins, Revit d'Autodesk met à disposition une palette d'outils de repérage et de cotations automatiques.

Les nomenclatures de Revit d'Autodesk permettent de mieux désigner les éléments des projets, celles-ci étant générées directement à partir du modèle et à toutes les étapes du processus de conception.

- **Plans de ferrailage :**

Deux approches uniques sont disponibles pour le ferrailage avec le logiciel Revit d'Autodesk :

→ **Le dessin de ferrailage :**

Revit d'Autodesk offre des outils faciles à utiliser et efficaces pour produire manuellement les plans d'armatures. Le démarrage se fait sur un fond de plan 2D, avec l'utilisation la bibliothèque d'armatures (barre droite, cadre, épingle, cerce, etc.) pour mettre en place le ferrailage.

Revit d'Autodesk gère immédiatement les enrobages, le diamètre des barres, les longueurs de recouvrement... le dessin est donc rapide et précis. Une visualisation 3D de la cage d'armature permet de contrôler à tout moment la disposition des aciers et leur non-collision.

Revit d'Autodesk offre de nombreux autres outils (repérage, schémas de façonnage, cotations spécifiques pour les barres, etc.).

→ **Le ferrailage paramétré :**

Les extensions liées à Revit d'Autodesk telle que Naviate permet d'associer un style de ferrailage à chaque élément de structure :

- ❖ En spécifiant le nombre de barres, les diamètres, les enrobages et les espacements.
- ❖ En créant les vues avec le ferrailage nécessaire.

La cage d'armature s'ajuste aux dimensions du coffrage et se met à jour quand des modifications apparaissent. Le ferrailage des poutres, des poteaux, des voiles, des semelles, des cages d'ascenseur et des escaliers... est automatique.

V.12.3 Synchronisation automatique :

Afin d'éditer le modèle, de nouveaux objets paramétriques devront être créés, modifiés ou supprimés. Grâce à la synchronisation automatique entre les vues 2D et 3D. Au fur et à mesure que le modèle se modifie, il devient simple de générer les plans, façades, coupes, plannings : tous ces documents ne sont que des exploitations différentes de la base de données.

La maquette numérique aide cette transition en permettant par exemple la modification d'un simple mur d'intérieur en une cloison composée. Si les propriétés des objets sont bien définies, la modification des caractéristiques d'une famille de murs peut être effectuée plus tard sans grande difficulté. Il est important au début du projet de garder une certaine flexibilité pour permettre des modifications ultérieures aisées, mais l'équipe de conception doit pour cela respecter les mêmes standards.

Pendant que les objets paramétriques sont modélisés, d'autres données leurs sont adjointes. Des tableaux peuvent être générés à partir de ces données, afin de les classer par critères. Puisque ces tableaux ne sont qu'une autre façon de voir les données contenues dans la maquette numérique, leur édition sera visible dans le modèle 3D.

C'est un outil très puissant qui peut être à double tranchant si les utilisateurs ne sont pas au courant des connexions entre les deux interfaces. Il est essentiel à ce niveau de bien comprendre que cette maquette est une base de données qui peut être vue et éditée sous plusieurs formes : des plans, des coupes, des façades, ou bien des tableaux. En éditant un objet dans une vue particulière ce sont toutes les instances de cet élément qui seront modifiées, même si elles ne sont pas visibles à l'écran.

V.12.4 Les quantitatifs :

La maquette numérique possède toutes les données nécessaires à l'établissement des quantitatifs. On peut y quantifier les matériaux et les pièces nécessaires. Elle nous permet d'extraire les informations nécessaires pour le calcul directement à partir de la modélisation 3D, nous obtenons une dérivation claire des calculs et des mesures de chaque élément du mètre. Ce qui permet de réduire considérablement les erreurs liées au calcul des volumes, des surfaces et des côtes (Figure V-29 - V-18).

Quantitatifs poteaux porteurs X				
<Quantitatifs poteaux porteurs>				
A	B	C	D	E
Type	Niveau de base	Niveau supérieur	Longueur	Volume
Poteau béton - Arrondi				
40	01 SS2	02 SS1	3.30	0.98 m³
40	02 SS1	03 RDC	4.22	1.26 m³
40	03 RDC	04 N1	5.74	1.44 m³
40	04 N1	05 N2	3.91	0.94 m³
50				
50	01 SS2	02 SS1	3.30	7.64 m³
50	02 SS1	03 RDC	4.22	9.90 m³
50	03 RDC	04 N1	5.74	13.52 m³
50	04 N1	05 N2	3.91	4.39 m³
50	05 N2	06 N3	3.91	4.39 m³
50	06 N3	07 N4	3.91	4.39 m³
50	07 N4	08 N5	3.91	4.39 m³
50	08 N5	09 N6	3.91	4.39 m³
50	09 N6	10 TOITURE	3.91	4.39 m³
Poteau béton - Rectangulaire				
40 x 90				
40 x 90	04 N1	05 N2	3.91	8.06 m³
40 x 90	05 N2	06 N3	3.91	10.74 m³
40 x 90	06 N3	07 N4	3.91	10.74 m³
40 x 90	07 N4	08 N5	3.91	10.74 m³
40 x 90	08 N5	09 N6	3.91	10.74 m³
40 x 90	09 N6	10 TOITURE	3.91	10.74 m³

Figure V-30 Quantitatifs poteaux porteurs

Quantitatifs Poutres		
<Quantitatifs Poutres>		
A	B	C
Famille	Type	Volume
Poutre rectangulaire - Béton		
Poutre rectangulaire - Béton	25 x 40	98.96 m³
Poutre rectangulaire - Béton	25 x 45	108.53 m³
Poutre rectangulaire - Béton	30 x 45	33.01 m³
Poutre rectangulaire - Béton	30 x 50	19.47 m³
Poutre rectangulaire - Béton	30 x 55	100.34 m³
Poutre rectangulaire - Béton	30 x 60	10.17 m³
Poutre rectangulaire - Béton	30 x 65	33.25 m³
Poutre rectangulaire - Béton	30 x 70	207.63 m³

Figure V-31 Quantitatifs Poutres

<Quantitatifs Voiles>			
A	B	C	D
Famille	Type	Largeur	Volume
Mur de base	20	0.20	16.67 m³
Mur de base	25	0.25	43.23 m³
Mur de base	30	0.30	1067.31 m³
Mur de base	35	0.35	444.54 m³
Mur de base	40	0.40	926.45 m³

Figure V-32 Quantitatifs Voiles

<Quantitatifs Dalles>			
A	B	C	D
Niveau	Epaisseur	Nombre	Volume
01 SS2	0.20	1	641.83 m³
02 SS1	0.20	1	641.83 m³
03 RDC	0.20	1	641.83 m³
04 N1	0.18	4	83.41 m³
05 N2	0.18	1	263.43 m³
06 N3	0.18	1	263.43 m³
07 N4	0.18	1	263.43 m³
08 N5	0.18	1	263.43 m³
09 N6	0.18	1	263.43 m³
10 TOITURE	0.18	1	263.43 m³

Figure V-33 Quantitatifs dalles

1. Les couts :

La maquette numérique permet d'associer au modèle 3D toutes les informations nécessaires à l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage, parmi ces informations figurent également celles relatives aux coûts des travaux à réaliser, qu'il s'agisse de travaux de construction neuve ou d'entretien, de restauration, de rénovation ou même de démolition du bien.

Le logiciel Revit d'Autodesk permet de relier entre les données des quantitatifs et les couts unitaires, il est possible d'accélérer au maximum les opérations de chiffrage en évitant les erreurs et en économisant du temps, offrant une meilleure maîtrise des coûts pour les entreprises de construction et les maîtrises d'ouvrage. Il est possible de :

- Avoir le contrôle visuel avec des affichages sélectifs directement sur le modèle 3D des entités calculées.
- Créer des modèles de calcul du devis à appliquer à tout autre projet.
- Mettre à jour le devis à chaque modification de projet.

2. Détection d'interférences :

L'existence de plusieurs parties prenantes différentes dans les projets de construction place la barre de la complexité à un niveau substantiel, mais il y a aussi le fait que l'ensemble du projet est limité dans le temps. Cela signifie que toutes les parties prenantes doivent atteindre un certain niveau de coopération pour que l'exécution de l'ensemble du projet de construction soit rapide et précise.

C'est là qu'intervient la détection des conflits, qui correspond au processus de superposition entre deux représentations du bâtiment, ayant pour objectif d'identifier les « conflits » entre

les deux entités. Les modèles 3D créés par les différentes disciplines peuvent être combinés pour s'assurer qu'il n'y a pas d'interférences. Cette méthode permet de vérifier que chaque objet n'utilise pas le même espace qu'un autre (exemple : une poutre coupant des canalisations), cela peut créer des complications coûteuses si la question n'est pas réglée avant le chantier.

Les conflits identifiés avant qu'il ne soit trop tard permettront de mettre en place des actions correctives et de réduire les coûts engendrés par des erreurs non identifiées en phase de construction. Chaque conflit éliminé pendant la phase de conception signifie un problème potentiel en moins qui aurait pu entraîner une modification de la conception à plusieurs niveaux, des retards dans le projet et des augmentations de budget.

Grâce à cette méthodologie, nous obtenons une matrice d'interférence, c'est-à-dire un tableau dans lequel les noms des assemblages sont croisés, en colonnes et en lignes, et où les rencontres entre eux sont marquées. De cette façon, nous obtenons un rapport de collision ordonné qui donne la priorité à la résolution des conflits critiques.

Tableau V-I : Matrice d'interférences.

MATRICE DE DETECTION DES CHOCS		ARCHITECTURE				STRUCTURE					MEP		
		Garde-corps	Escaliers	Portes	Fenêtres	Poteaux	Fondations	Voiles	Dalles	Portiques	Mécanique	Electrique	Plomberie
ARCHITECTURE	Garde-corps												
	Escaliers												
	Portes												
	Fenêtres												
STRUCTURE	Poteaux												
	Fondations												
	Voiles												
	Dalles												
	Portiques												
MEP	Mécanique												
	Electrique												
	Plomberie												

V.12.5 Maitrise des enjeux environnementaux :

À l'heure actuelle, il n'est plus possible d'ignorer les défis auxquels la planète fait face du

point de vue environnemental. Dans toutes les industries, de nombreux changements s'opèrent déjà et doivent se multiplier pour limiter l'impact écologique de l'homme sur la nature. Les professionnels du bâtiment sont eux aussi directement concernés puisque le secteur du bâtiment et des travaux publics occupe une place centrale dans la question des enjeux écologiques. Ainsi, le secteur de la construction représente 10% des émissions de gaz à effet de serre (GES) mondiales (Figure V-34) et le béton, 52% des émissions de ce secteur (Figure V-35).

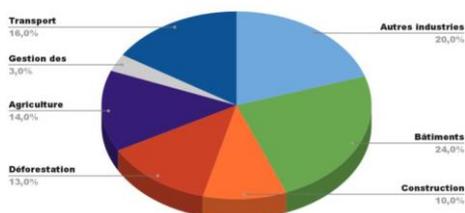


Figure V-36 Emissions GES en fonction du secteur industriel

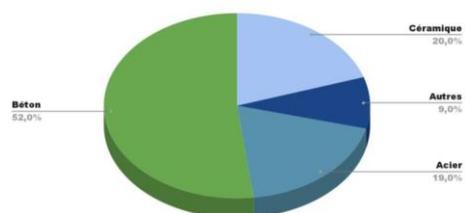


Figure V-37 Emissions GES en fonction du matériau

L'émergence de l'écoconstruction, est un pas en avant notable dans cette évolution. La notion d'écoconstruction, ou construction écologique, désigne les bâtiments conçus pour être les plus respectueux possibles de l'environnement. On prend, comme exemples, l'aspect relié aux choix des matériaux et l'empreinte carbone. La maquette numérique permet de quantifier des matériaux et de comparer des variantes en phase conception, c'est-à-dire au moment où sont prises les décisions qui influencent le bilan environnemental. La récupération de quantitatifs issus des maquettes numériques permettent une fiabilité accrue et facilite les itérations successives de l'étude.

L'empreinte carbone est un indicateur qui vise à mesurer l'impact d'une activité sur l'environnement, et plus particulièrement les émissions de gaz à effet de serre liées à cette activité. L'empreinte carbone du secteur de la construction est significative pour de nombreuses raisons :

- Production des matériaux.
- Transport des produits.
- Consommation de carburant sur les chantiers.
- Pratiques de recyclage.

L’empreinte carbone du béton peut varier considérablement, selon d’une part sa formulation mais également le ferrailage nécessaire pour les performances attendues. Il est donc important d’utiliser les données environnementales les plus précises possibles, correspondant réellement aux bétons et armatures utilisés, et non les données par défaut.

Nous pourrions à travers la maquette numérique examiner et évaluer différents scénarios de matériaux et/ou de modes constructifs dès la conception de l’ouvrage mais aussi en cours d’exécution quand il s’agit par exemple de mettre au point une variante ou une adaptation. Les concepteurs peuvent alors évaluer comment se situe son projet par rapport à des valeurs de référence et si les impacts environnementaux sont trop élevés ils peuvent continuer à améliorer le projet.

Le bilan carbone d’un bâtiment est la quantification ou la comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre inhérentes à cette structure, sur l’ensemble de son cycle de vie. Cela comprend la conception, la construction, l’exploitation, la consommation d’énergie tout au long de la vie du bâtiment et la démolition.

Avant d’améliorer un bilan carbone, il faut déjà le calculer. L’utilisation de la maquette numérique d’un bâtiment, permet d’y parvenir et de le faire évoluer. À partir de telles informations, il est plus aisé et plus précis pour dégager des pistes d’amélioration.

La maquette numérique permet également de quantifier des matériaux et de comparer des variantes en phase conception, c’est-à-dire au moment où sont prises les décisions qui influencent le bilan environnemental. La récupération de quantitatifs issus des maquettes numériques permettent une fiabilité accrue et facilite les itérations successives de l’étude. La maquette nous aide à faire les choix les plus pertinents d’un point de vue économique et environnemental. Nous pourrions ainsi, examiner et évaluer différents scénarios de matériaux et/ou de modes constructifs dès la conception de l’ouvrage mais aussi en cours d’exécution quand il s’agit par exemple de mettre au point une variante ou une adaptation. Les concepteurs peuvent alors évaluer comment se situe son projet par rapport à des valeurs de référence et si les impacts environnementaux sont trop élevés ils peuvent continuer à améliorer le projet.

La maquette numérique pourrait être liée à des logiciels permettant de comparer facilement différents paramètres architecturaux et techniques, et, par exemple, de choisir l’orientation d’un bâtiment et la surface des fenêtres pour améliorer l’efficacité énergétique.

3. Le temps :

En ajoutant la dimension temporelle, on a la possibilité de réaliser simultanément un phasage 3D et un planning (diagramme de Gantt). Les données de modélisation peuvent être importées depuis la maquette tandis que les détails des plannings incluant les équipes, les étapes importantes et les dates de livraison seront apportées par des logiciels de gestion de

projet. Ces données sont utilisées pour créer des séquences qui peuvent être très étalées dans le temps par exemple le phasage sur plusieurs années depuis un plan général, ou extrêmement détaillée comme un chantier incluant tout le matériel de construction.

Pour les planificateurs, une meilleure compréhension visuelle des interventions permet de mieux organiser le chantier et donc, de réduire la coactivité et d'optimiser les interventions des entreprises. Avec les logiciels de planification, il est plus aisé de mettre à jour le planning et de visualiser immédiatement la réorganisation engendrée par une modification. Cela conforte le travail des planificateurs. Cependant, cela requiert une très bonne connaissance des coulisses d'un chantier, et le travail demandé dépendra grandement de la complexité du chantier.

Dès lors que chaque objet a été affecté à une tâche du planning il devient possible de faire glisser le « curseur d'avancement » le long de l'échelle de temps et de voir la maquette 3D évoluer, avec la possibilité de modifier l'apparence des ouvrages : par exemple, colorier en vert les ouvrages en cours de construction, en rouge ceux démolis, en gris ceux déjà construits...

4. Le chantier :

La maquette numérique peut être exploitée dans différentes phases du chantier :

- En utilisant la maquette numérique pour simuler le chantier, il est possible d'identifier les risques potentiels pour la sécurité des travailleurs et de mettre en place des mesures préventives.
- La maquette numérique peut aussi être très utile pour optimiser la phase de démolition des bâtiments. Cette optimisation comporte deux axes : l'amélioration du suivi des travaux et la valorisation des matériaux dans une logique d'économie circulaire. Celle-ci contient toutes les informations concernant les matériaux, les éléments de construction mis en œuvre ainsi que leur emplacement. Il est alors possible d'organiser et planifier leur démontage, d'évaluer les opportunités de recyclage, les contraintes liées à l'évacuation, tout en permettant leur traçabilité. Les matériaux de l'établissement à déconstruire sont alors réinjectés dans un circuit d'économie circulaire lorsque c'est possible.
- Les projets de réhabilitation, de rénovation, d'amélioration de la gestion de patrimoine doivent, eux aussi, pouvoir bénéficier d'un outil intelligent, qui favorise l'interopérabilité entre tous les acteurs d'un projet. Tout projet de réhabilitation requiert une évaluation préalable du budget nécessaire et des risques auxquels les intervenants sont susceptibles d'être confrontés durant la réalisation des travaux de rénovation. La maquette numérique peut servir de support pour tester différentes hypothèses pour la réhabilitation. Les intervenants disposent également d'informations fiables sur les éléments de structure et les procédés constructifs dans le cas de rénovations.

V.13 Conclusion

Le monde du bâtiment s'adapte pour digitaliser ses processus. La maquette est au centre de cette révolution numérique qui implique une autre façon de travailler et de réfléchir.

La maquette numérique représente une évolution majeure dans le domaine de la construction. Elle offre une approche plus intelligente et plus efficace pour concevoir, construire et gérer des bâtiments.

Nous avons procédé à l'examen des deux modèles, physique et analytique, générés pour la maquette structurelle élaborée via Revit. Il est à noter que le modèle analytique nécessite des ajustements spécifiques après sa génération automatique afin de garantir son intégration correcte dans les logiciels d'analyse par éléments finis et une amélioration de l'interopérabilité.

Elle améliore la coordination, la planification, la gestion des coûts et la durabilité. La transition numérique et écologique dans le domaine du bâtiment représente une opportunité inestimable pour promouvoir la durabilité et l'efficacité. Cette dernière favorise également l'innovation en répondant aux besoins croissants de populations urbaines.

VI. INTRODUCTION AU BIM / CIM

VI.1 Introduction

L'Building Information Modeling (BIM), représente une avancée majeure dans le domaine de l'ingénierie et de la construction. Cette approche révolutionnaire transcende les méthodes traditionnelles de conception et de gestion de projets, en apportant une dimension numérique et collaborative sans précédent à l'industrie du bâtiment.

Dans cette introduction au BIM, nous explorerons plus en profondeur cette méthodologie révolutionnaire, en examinant ses principes fondamentaux, en découvrant également comment le BIM influence l'aménagement urbain à une échelle plus vaste.

VI.2 Introduction au Building Information Modeling

La norme ISO 19650-1 donne la définition suivante :

« L'utilisation d'une représentation numérique partagée d'un actif bâti pour faciliter le 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 un mode de travail collaboratif qui consiste à compiler de manière structurée et ordonnée, au sein d'un modèle informatique, les informations relatives à un ouvrage de construction, servant ainsi à simuler ses caractéristiques physiques et fonctionnelles. Cette compilation est partagée entre les acteurs du projet de construction. Elle peut être enrichie tout au long du cycle de vie du bâtiment depuis sa conception, sa construction, son exploitation jusqu'à sa démolition.

VI.3 Les dimensions du BIM

Un modèle BIM peut être utilisé à des fins spécifiques prédéfinies, Selon les exigences de l'étape du projet et la complexité du projet, des paramètres spécifiques sont ajoutés aux informations existantes contenues dans le BIM. Ces ajouts de cas d'utilisation prédéfinis peuvent être décrits comme des dimensions BIM (Figure VI-1).

- 3D : La géométrie

La 3D représente les trois dimensions géographiques (x, y, z) d'une structure de bâtiment. Le BIM 3D permet à toutes les parties prenantes de collaborer efficacement pour la modélisation et la résolution de problèmes structurels typiques.

- 4D : Temps

La 4D est lié à la planification du chantier en ajoutant un nouvel élément à savoir le temps. Les données de planification aident à indiquer combien de temps sera impliqué dans l'achèvement du projet et comment le projet évoluera au fil du temps. Les informations peuvent fournir des précisions sur le temps nécessaire pour l'installation ou la construction, le temps nécessaire pour rendre le projet opérationnel, la séquence d'installation des divers composants, ainsi que d'autres informations de planification.

- 5D : Coûts

Le BIM 5D est utile pour une analyse budgétaire et une estimation des coûts qui sont nécessaires dès le début de tout projet. Le coût est l'un des éléments les plus importants associés à un projet. 5D BIM permet aux promoteurs et propriétaires de projets d'analyser les coûts qui seront encourus au fil du temps dans les activités du projet.

- 6D : Performances

La modélisation des informations du bâtiment 6D permet d'analyser la consommation d'énergie d'un bâtiment et de produire des estimations énergétiques aux étapes de conception initiales. Prenant en compte les différentes étapes de vie d'une structure, 6D BIM assure une prédiction précise des besoins en consommation d'énergie.

La technologie 6D BIM pousse l'industrie un pas au-delà de l'approche conventionnelle qui se concentre uniquement sur les coûts initiaux associés à un projet. Cette approche permet de se faire une idée du coût total d'un actif et de la manière dont l'argent devrait être dépensé pour atteindre la durabilité et la rentabilité.

- 7D : Maintenance

7D BIM concerne les opérations et la gestion des installations par les gestionnaires et les propriétaires d'immeubles. La dimension est utilisée pour suivre les données importantes de l'actif telles que son état, les manuels de maintenance et d'exploitation, les informations de garantie, les spécifications techniques, à utiliser ultérieurement. Une telle approche contribue à améliorer la qualité de la prestation de services pendant tout le cycle de vie d'un projet.



Figure VI-2 Dimensions BIM

VI.4 Les niveaux du BIM

Tout projet BIM doit inclure une stratégie de modélisation, conçue en fonction des objectifs préalablement définis. La qualité d'un modèle est déterminée par le LOD du projet.

Le LOD se compose de 2 aspects complémentaires, c'est à dire le niveau de représentation et niveau d'information :

- **LOG** : la géométrie ou la représentation visuelle d'un projet.
- **LOI** : les données attachées aux objets de la maquette BIM.

$$\text{LOD} = \text{LOG} + \text{LOI}$$

VI.4.1 Les différents niveaux LOD

Le LOD peut être interprété comme le degré de fiabilité de la maquette BIM. C'est le degré auquel la géométrie d'un élément et les informations associées (non graphiques) ont été développées (Figure VI-3). On distingue :

LOD 100 : les éléments du modèle peuvent être représentés par un symbole ou de manière générique. L'objet ne contient aucune information supplémentaire.

Le LOD 100 correspond au niveau de détail géométrique le plus bas. Ainsi, une modélisation au LOD 100 représente l'enveloppe des objets avec des volumes simples.

Les maquettes de ce niveau de détail restent très abstraites et approximatives, les usages associés sont donc assez limités. Une maquette au LOD 100 peut être utile pour une simple étude de préconception, pour conceptualiser une idée ou mener une étude de faisabilité basique ne nécessitant qu'une représentation « grossière » des volumes du bâti.

LOD 200 : Au LOD 200, le modèle BIM est considéré comme un modèle de conception simple. Les objets restent génériques, la position, l'orientation, la forme et la taille des objets géométriques restent approximatifs et inadaptés pour des usages complexes. Parallèlement, des spécifications comme les caractéristiques des matériaux ne sont pas intégrées.

Dans le cadre d'un projet de construction ou de rénovation, une maquette au LOD 200 sera très souvent suffisante en phases d'APS (Avant Projet Sommaire) ou d'APD (Avant Projet Définitif). En effet, ce niveau de détail permettra de fournir une proposition technique à un projet, notamment en ce qui concerne l'architecture générale, ou concernant l'estimation du volume de travaux et de coûts associés.

LOD 300 : Les objets modélisés au LOD 300 offrent une géométrie plus précise. À la différence du LOD 200, on considère que la taille des objets 3D est juste. Les objets 3D ne sont pas des objets fournis par un fabricant, mais le responsable de modélisation se sera appliqué à produire des objets aux dimensions du réel.

Au-delà de la précision des objets, une modélisation au LOD 300 peut impliquer l'ajout d'informations aux objets BIM comme les types de matériaux utilisés, la distinction entre l'intérieur et l'extérieur de la paroi, ou des précisions concernant le rôle des murs et de la structure (porteuse, ou non-porteuse).

LOD 400 : Dans un niveau de détail LOD 400, le nombre, la taille, la forme et l'orientation des objets doivent être mesurables directement dans le modèle. Les murs, cloisons, dalles et plafonds sont modélisés de manière à ce que les différentes couches qui les composent soient également détaillées.

La finalité de ce niveau de détail est de fournir des référentiels géométriques suffisamment enrichis et précis pour la fabrication de l'objet. Ce standard devient ainsi un référentiel adéquat au stade de construction d'un bâtiment.

LOD 500 : L'objet contient tous les éléments d'informations vérifiées sur le terrain. Ce niveau permet la mise à jour de la maquette numérique afin d'être conforme à ce qui a été réalisé.

Le niveau de détail LOD 500 est égal à celui du LOD 400, cependant l'ensemble des éléments

modélisés doivent avoir été vérifiés sur le terrain, après la construction ou la rénovation du bâtiment. Cette vérification peut notamment passer par un scan 3D du bâtiment, dont le nuage de point généré et représentatif du réel sera confronté à la maquette numérique pour la mettre à jour si nécessaire.

Ainsi, on obtient une modélisation « as-built » du bâtiment, un véritable support durable pour exploiter le potentiel de la maquette BIM de son actif.

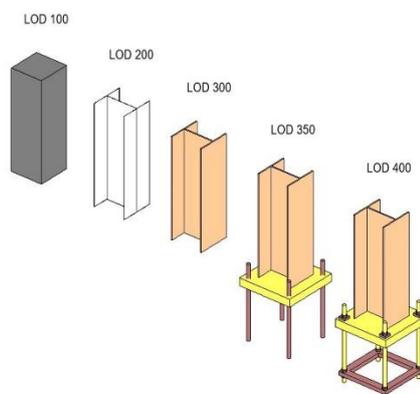


Figure VI-4 Modélisation objet poutre avec différents LOD

VI.5 Le format d'échanges IFC

L'IFC (Industry Foundation Classes) est un format de fichier qui organise, structure, hiérarchise les informations d'une maquette numérique. Ce format facilite le partage de données et l'interopérabilité entre différents logiciels BIM (exportation, modification, etc.). Plus concrètement, il offre aux intervenants concernés un accès libre à toutes les données de la maquette, qu'importent les outils informatiques utilisés. Le format IFC est un standard international pour l'échange des modèles numériques lors d'un processus BIM.

Cependant, malgré son potentiel, le format IFC connaît quelques limites. Certes, l'objectif principal du format IFC est de permettre l'échange d'un modèle sans perte ni distorsion de données. En revanche, le principal risque lors de l'utilisation de ce format est justement la perte d'informations au moment du transfert de la maquette numérique d'un logiciel à un autre.

Ce risque existe du fait que tous les logiciels métiers ne sont pas conçus de la même manière. Ils n'utilisent pas tous la même structuration de la donnée non plus. Dans certains cas d'utilisation, il peut arriver que les données soient déformées ou tout simplement perdues au moment de l'import/export d'un modèle numérique en format IFC.

Afin de contrer ces risques, des comités internationaux de normalisation BIM ont instauré des normes très précises. Ces dernières offrent une certaine méthodologie qui structure et traduit les termes et les définitions de la sémantique commerciale dans le cadre bâti. Dès lors, toutes les parties prenantes parlent le même langage, ce qui limite le risque de perte ou de distorsion de données.

VI.6 Les standards BIM

Avec l'avancement constant de l'innovation technologique, le BIM est de plus en plus utilisé et répandu. C'est pourquoi il est d'une importance fondamentale que même ce dernier comme toute autre technologie ou méthodologie soit réglementé par des normes internationales.

VI.6.1 La norme ISO 19650

ISO 19650 (Organisation de l'information sur les travaux de construction – Gestion de l'information dans l'utilisation du BIM) est une norme internationale qui réglemente la gestion de l'information sur l'ensemble du cycle de vie d'un bien construit, en utilisant la modélisation de l'information du bâtiment (BIM Building Information Modeling).

Il définit les processus collaboratifs pour la gestion efficace de l'information pendant la phase de livraison et d'exploitation des biens.

Elle se compose en 5 parties :

- Partie 1 – Concepts et principes généraux.
- Partie 2 – Phase de réalisation des actifs.
- Partie 3 – Phase d'exploitation des actifs.
- Partie 4 – Echange d'informations.
- Partie 5 – Approche de la gestion de l'information axée sur la sécurité.

VI.6.2 La norme ISO 16739

La ISO 16739 « Industry Foundation Classes (IFC) pour le partage de données dans les secteurs de la construction et de la gestion des installations » est un standard international ouvert pour les données BIM qui sont échangées et partagées entre les applications logicielles utilisées par les différents participants à un projet de construction ou de gestion des installations.

VI.7 Open BIM et Closed BIM

La méthodologie Open BIM favorise l'interopérabilité et la collaboration entre différentes disciplines et logiciels, tandis que le Closed BIM limite l'accès aux données et processus à un seul logiciel ou à une suite de logiciels propriétaires (Figure VI-5).

VI.7.1 Open BIM

L'open BIM, c'est la possibilité de pouvoir échanger des données entre logiciels BIM d'éditeurs différents, grâce à un standard d'échange.

L'open BIM étend les avantages du BIM (Building Information Modeling) en améliorant l'accessibilité, la convivialité, la gestion et la durabilité des données numériques dans l'industrie de la construction.

Les processus open BIM peuvent être définis comme des informations de projet partageables qui prennent en charge une collaboration transparente pour tous les participants au projet. L'open BIM facilite l'interopérabilité au profit des projets et des actifs tout au long de leur cycle de vie.

VI.7.2 Closed BIM

le BIM fermé ou closed BIM, décrit une utilisation restreinte de la méthode BIM lors du déroulement du projet. La limitation résulte avant tout de la restriction aux produits et formats d'un unique éditeur de logiciel dans l'objectif de réduire au maximum les conversions de

données nécessaires. Cette méthode implique un processus fermé et restrictif qui rend difficile la collaboration avec des professionnels qui utilisent différents outils, applications et logiciels.

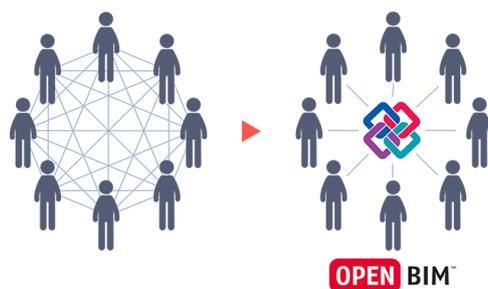


Figure VI-6 Echanges OpenBIM

VI.8 Le BIM à l'échelle urbaine

L'approche du BIM a permis de familiariser les acteurs de l'aménagement à l'intérêt et aux enjeux de la maquette numérique. De cette expérience naît un besoin grandissant d'étendre la démarche de la maquette numérique à l'échelle urbaine (ville, territoire).

Lors de la conception d'un ouvrage, l'un des aspects à considérer est son insertion dans l'environnement territorial. Il est essentiel, en effet, de toujours garder à l'esprit le lien qui existe entre le bâtiment et l'urbanisme, le paysage et les aspects liés aux besoins sociaux et économiques, en contextualisant le bien dans le territoire où il sera inséré.

On modélise les données de la ville sans se limiter aux informations utiles aux propriétaires et aux locataires d'immeubles mais à tout usager urbain. Les informations de la ville deviennent visualisables sur le modèle numérique BIM.

Il est ainsi possible de faire des scénarios et toutes les simulations voulues à travers des maquettes numériques BIM de villes ou de morceaux de ville.

Cela permet notamment d'anticiper :

- Les risques.
- Les événements naturels et climatiques.
- Les sujets de mobilité urbaine, la gestion des ressources.
- La gestion de l'énergie.
- La logistique en ville.
- L'impact carbone.

VI.8.1 Le système d'information géographique (SIG)

Le SIG est un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace géographique.

Des croisements de données entre le Système d'informations géographiques (SIG) et les simulations faites sur les maquettes numériques des villes conduisent à anticiper l'ensemble des risques bien plus finement qu'auparavant.

BIM + SIG = CIM

Nous passons d'une analyse à l'échelle de zones ou de quartiers à une analyse plus fine à l'échelle de bâtiments ou de terrains dans ces secteurs (Figure VI-7).

En associant les deux technologies complémentaires, on peut modéliser des écosystèmes qui vont bien au-delà de l'immeuble et ainsi prévoir des réseaux de raccordement cohérents, des infrastructures véritablement accessibles, ou encore envisager des simulations à l'échelle de la ville (trafic routier, accident, événement naturel, etc) et comprendre leur impact sur les bâtiments. Lier le BIM et le SIG est le meilleur moyen de construire les fameuses "villes intelligentes" du futur : ces villes connectées et intelligentes qui analysent et améliorent en permanence leur fonctionnement.

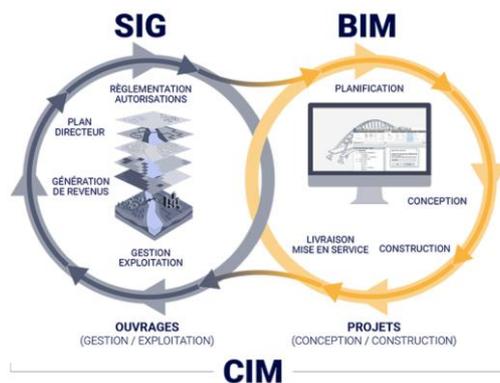


Figure VI-8 Association BIM SIG

VI.8.2 City information modeling (CIM)

Le CIM est une maquette de ville qui peut stocker des informations sur tous les bâtiments, espaces publics, les propriétaires des terrains, les règles d'urbanisme qui s'appliquent, etc. Mais c'est aussi un outil qui permet de dessiner la ville en faisant des simulations pour évaluer rapidement les qualités du projet en fonction des choix faits, et cela à plusieurs échelles. C'est un précieux outil d'aide à la décision pour les aménageurs.

VI.8.3 Utilité du CIM

La collaboration est l'un des éléments clés du BIM et le même potentiel de collaboration s'applique certainement au CIM.

Comme le BIM pour le secteur du bâtiment, le CIM permet aux concepteurs de travailler en équipe sur une série de modèles 3D virtuels, de manière interactive et en temps réel. Cette façon de travailler, comparée aux méthodes traditionnelles, offre des résultats optimaux à moindre coût, notamment dans les domaines pluridisciplinaires, à travers un projet interactif et en temps réel.

Grâce au CIM, il est beaucoup plus facile d'analyser différents scénarios de conception, d'évaluer les risques, les solutions et de prendre des décisions planifiées et partagées, en limitant les erreurs et les événements inattendus. Il est possible de réaliser des projets à n'importe quelle échelle.

Le CIM permet également des évaluations complexes telles que l'analyse de l'ensoleillement, du microclimat, de la technologie d'éclairage, du trafic et de l'impact des catastrophes naturelles (telles que les tremblements de terre, les ouragans, les alluvions, les inondations, etc.). Les modèles CIM sont principalement utilisés par les architectes, les ingénieurs, les urbanistes et les professionnels impliqués dans la conception à toute échelle.

Dans le modèle BIM, lorsqu'un élément (ou un objet paramétrique) est modifié, toutes les vues montrant cet élément sont mises à jour en temps réel et automatiquement. Cela permet aux concepteurs et aux entrepreneurs d'avoir toujours accès à des **informations mise à jour**. Cela se produit également dans les modèles CIM et représente un grand avantage, en particulier dans le cas de modèles complexes.

VI.8.4 BIM SIG et CIM

Pour planifier des villes intelligentes, il serait très utile de combiner les informations et les avantages découlant de l'application des technologies BIM, SIG et CIM.

Comme nous l'avons vu, le concept de CIM consiste à modéliser les informations de modèles urbains et infra structurels, en utilisant une grande quantité de données multidisciplinaires.

En intégrant ces données avec celles dérivées à partir des Systèmes d'Information Géographique (SIG), qui positionnent les modèles et les données sur une carte géoréférencée, et à partir du BIM (Building Information Modeling), il est possible de générer un système structuré qui relie l'infrastructure à son contexte urbain.

Cela génère un processus décisionnel éclairé pour toutes les parties prenantes impliquées et facilite les choix à planifier. C'est par exemple le système optimal pour choisir l'emplacement idéal d'un bâtiment en fonction de sa destination et de l'évolution potentielle du paysage urbain environnant

VI.9 Conclusion

Le Building Information Modeling (BIM) et le City Information Modeling (CIM) représentent deux avancées majeures dans le domaine de la modélisation numérique et de la gestion de l'information. Le BIM a révolutionné l'industrie de la construction en intégrant la modélisation numérique à tous les aspects du cycle de vie d'un bâtiment, de la conception à la gestion de patrimoine. De son côté, le CIM élargit cette approche au niveau urbain, en appliquant des principes similaires à la planification, à la gestion et au développement des villes. Il permet une meilleure gestion des infrastructures urbaines, une planification plus intelligente et une réponse plus efficace aux besoins complexes des communautés urbaines en croissance constante.

VII. La Mise en Œuvre du BIM

VII.1 Introduction

Lors d'une adaptation au BIM, la modification des pratiques de bureau est assez similaire à celle qui a lieu lors du passage du travail à la main à la CAO. C'est particulièrement vrai pour les étapes de changement de technique, du dessin 2D à la 3D paramétrique, et celles de modification de la façon globale d'imaginer un projet.

L'intégration du BIM a plus de conséquences sur les méthodes de travail qu'un simple changement de matériel informatique et logiciel. Cela découvert, la direction de l'entreprise peut alors concentrer ses efforts sur l'amélioration de la productivité, sur l'évolution de la rentabilité économique et sur le développement de nouveaux services à proposer.

VII.2 Etapes de mise en œuvre du BIM

Avant que le premier projet BIM soit rendu, sept sujets doivent être creusés afin de répondre aux préoccupations liées à la mise en œuvre du BIM: la motivation du projet, les objectifs, le plan, l'investissement, les logiciels BIM, les éventuels autres logiciels et le matériel informatique.

Une équipe capable de répondre à ces questions doit être assemblée : au minimum, elle comprend le BIM manager, le responsable informatique de l'entreprise, un chef de projet intéressé par la question et au moins l'un des responsables de l'entreprise. Dans une petite structure où l'implémentation du BIM ne sera dirigée que par une personne, il est particulièrement important de trouver ou d'embaucher quelqu'un ayant de l'expérience dans les nombreux domaines où les méthodes de l'agence seront bouleversées

VII.2.1 La question de la motivation

Comprendre pourquoi une société décide de se convertir au BIM et de qui vient la décision (des dirigeants, de jeunes membres de l'équipe de conception enthousiasmés par le BIM, des chefs de projet, des clients) aidera à se donner des objectifs pour réussir la conversion. Les raisons ne manquent pas le BIM peut par exemple être un argument économique fort et améliorer les profits de la société, car il peut aider à économiser du temps, il peut améliorer la qualité de travail, il produit peu d'erreurs et réduit le nombre de demandes d'information supplémentaire s'il est géré correctement. Beaucoup d'exemples le confirment, mais ce n'est pas forcément garanti. Certaines structures voient dans le BIM une méthode de collaboration plus efficace pour travailler avec des partenaires qui seraient déjà équipés avec des logiciels compatibles. La raison du changement de méthode peut aussi venir de l'extérieur, par exemple pour répondre à la demande d'un client réclamant des fichiers BIM à la livraison. Ce type de demande provient en général de maîtres d'ouvrage ayant un patrimoine pérenne, soit l'État, les collectivités, les universités, les hôpitaux ou les grands groupes. Dans la mesure où leurs bâtiments durent longtemps et sont régulièrement rénovés, ces maîtres d'ouvrage comprennent les bénéfices à long terme du BIM et l'importance de la gestion du cycle de vie d'un édifice. Une autre raison de changer de manière de travailler peut-être la volonté de rester à la page et donc d'adopter les innovations dans la profession, ou bien on peut vouloir agrandir le panel des services proposés aux clients, ou s'ouvrir à de nouvelles opportunités commerciales comme l'amélioration du portefeuille immobilier d'un client ou la gestion de bâtiment.

VII.2.2 Les objectifs

Une fois que la raison de l'évolution des pratiques de la société est mieux comprise, des objectifs doivent être donnés. Il est ensuite nécessaire d'estimer l'investissement en temps, le calendrier et les coûts approximatifs du changement de fonctionnement. Les objectifs doivent être clairement énoncés. Il faut également des ressources en personnel pour la planification et la formation. Les outils sont modifiés pour s'adapter aux pratiques de l'agence, des analyses BIM sont effectuées tout au long de la conception, les processus de projet collaboratif BIM sont bien intégrés, de nouveaux services sont proposés.

VII.2.3 Le plan

Il s'agit dans un premier temps d'écrire un plan d'intégration, à faire vérifier et approuver par un responsable de la société. Ce travail nécessite une étude préliminaire des méthodes de travail.

De quelle manière, approximativement, se décompose la répartition des honoraires en fonction des phases ?

Combien de temps dure chaque phase en règle générale ?

Qu'est-ce qui fonctionne bien et qu'est-ce qui pourrait être amélioré ?

Comment le travail va-t-il se répartir sur ces nouveaux projets entre les membres de l'équipe ayant le plus d'expérience et le plus de connaissances en construction et de nouveaux venus, fraîchement diplômés mais plus à l'aise dans l'utilisation des outils informatiques ?

Analyser les méthodes, procédures, dépenses et revenus actuels permettra de comparer les performances actuelles de la société sur des projets BIM.

VII.2.4 Les investissements

Le changement nécessite de l'argent.

Combien est-ce que l'entreprise est prête à apporter comme investissement initial ?

Quel est le retour sur investissement prévu ?

Ces questions doivent être prises en compte dans la description des objectifs. Dans les coûts initiaux (qui doivent être mûrement réfléchis), on peut inclure les logiciels, le matériel informatique, la formation et le support informatique. Pour le support, on peut se contenter du service après-vente du logiciel, envisager du temps de conseil additionnel ou encore l'embauche ou la formation d'un spécialiste BIM pour faciliter l'implémentation BIM. La part la plus importante du budget est souvent investie pendant la période de transition, lorsque la productivité de l'entreprise baisse alors qu'elle s'adapte aux nouveaux logiciels, au nouveau matériel et aux nouvelles méthodes.

VII.2.5 Les logiciels

Le choix d'un logiciel semble être la décision la plus importante au début de l'implémentation du BIM, mais ce choix ne devrait pas avoir de trop grosses conséquences sur la vitesse d'adoption de la méthode BIM. Si la solution choisie ne s'avère pas compatible avec le personnel ou les méthodes de la société et qu'on achète finalement un autre logiciel, ce ne sera pas un désastre. Quelques années plus tard, une autre solution logicielle et de nouveaux équipements informatiques sortiront de toute manière. Chaque logiciel possède des points forts et des faiblesses. Certains sont plus courants, d'autres plus spécialisés pour des tâches précises. Tous ont leurs adeptes et la meilleure façon pour les membres de l'équipe gérant l'implémentation de se faire une bonne opinion du logiciel le mieux adapté à la société est d'en discuter avec leurs collègues et de visiter d'autres structures pour voir comment ils utilisent les logiciels.

Ils peuvent aussi participer à des rencontres d'utilisateurs et se renseigner.

Des représentants des éditeurs de logiciels font parfois des démonstrations des capacités leurs produits, c'est l'occasion de leur poser des questions concernant la présence ou non d'éléments indispensables au travail de la société. Une partie de l'équipe d'implémentation devrait pouvoir essayer le logiciel, peut-être même recevoir des cours gratuits pour en apprendre les bases. Les tests de logiciel consultables dans la presse ou sur Internet sont une autre source d'information, mais ils peuvent ne pas répondre à certaines interrogations. Il ne faut pas non plus s'attendre à n'y trouver que des opinions impartiales. La meilleure source d'information reste encore la discussion avec des collègues dont on estime l'avis, le travail et qui possèdent des méthodes de travail similaires à celles de l'entreprise.

VII.2.6 Les outils

L'achat d'autres types de logiciels peut être nécessaire s'ils sont compatibles avec les objectifs d'implémentation du BIM. Il est très probable que la structure en possède déjà certains, comme les logiciels de CAO dont il ne vaut mieux pas se séparer pour le moment. Parmi les autres possibilités, il peut être intéressant de se pencher sur la vérification d'interférences, la vérification de la conformité du BIM en vue de la construction, les estimations de coûts, la gestion de projet collaborative et les logiciels d'analyses et d'études (calculs de consommation d'énergie, conformité avec les normes et codes, études structurelles, etc.). Au fur et à mesure que la société progresse dans l'implémentation du BIM, de nouveaux logiciels permettront de rendre de nouveaux services et de proposer des pratiques innovantes.

VII.2.7 Le matériel informatique

Le parc informatique devra très certainement être modernisé. Les fichiers BIM, formés d'une description en 3D du bâtiment et des données associées à ces composants, sont souvent bien plus lourds que leurs équivalents CAO et nécessitent du matériel performant. Il est également nécessaire de changer le processeur et d'augmenter la quantité de mémoire vive et la capacité des disques durs. Les minimums requis pour faire tourner les logiciels ne sont que cela, des minimums. La qualité du matériel informatique est essentielle, car elle évite à l'équipe de perdre du temps, ce qui pourrait coûter finalement plus cher. Les installations réseaux et la qualité de la connexion Internet devront aussi certainement être améliorées. Les services informatiques dématérialisés sont aussi à envisager. Cela peut être une solution de stockage hors site pour réaliser des archivages, comme cela peut prendre la forme d'un serveur BIM, décrit plus en détail dans le chapitre Le responsable informatique devra aussi réfléchir aux autres changements introduits par le BIM et à leur impact sur les systèmes existants.

VII.3 Conclusion

Il est indéniable que le Building Information Modeling (BIM) représente une avancée technologique majeure dans le domaine de la construction et de la gestion de projets. Cependant, il est essentiel de reconnaître que son adoption et sa mise en œuvre efficace nécessitent bien plus qu'un simple investissement dans des logiciels et des technologies de pointe. La réussite du BIM dépend largement de la mise en place d'une méthodologie adaptée et d'une transformation culturelle au sein des organisations.

VIII. CONCLUSION GENERALE

Conclusion

Ce projet de fin d'études nous a offert une précieuse opportunité de mettre en pratique les notions théoriques que nous avons acquises au cours de notre formation académique. Il a été un terrain d'application concret, où nous avons pu constater à quel point la transition de la théorie à la pratique peut être enrichissante et instructive.

Notre formation académique nous a fourni la base intellectuelle nécessaire, et le mémoire de fin d'études nous a permis de voir comment ces connaissances se traduisent dans le monde réel. En effet, tandis que l'une nous enseigne les principes fondamentaux, l'autre nous offre l'occasion de les tester, de les adapter et de les perfectionner en situation réelle.

La première partie de notre travail a porté sur l'analyse de la superstructure d'un ouvrage. Nous avons mis en application des méthodes de calcul des structures, base essentielle pour la conception et la construction d'une structure. Cette expérience nous a permis de mieux appréhender la conception de projets à venir.

La deuxième partie de notre travail a porté sur la création d'une maquette numérique. Cette étape a été essentielle pour comprendre comment les avancées technologiques transforment fondamentalement la façon dont nous concevons, construisons et gérons les structures. La maquette numérique s'est révélée être un outil puissant, nous permettant de visualiser, analyser et collaborer de manière plus efficace et précise.

Cette expérience nous a permis de mieux comprendre les avantages et les limites de la maquette numérique. Nous avons également appris à l'utiliser de manière productive et efficace. En conclusion, ce projet de fin d'études a été une expérience enrichissante et formatrice. Il nous a permis de développer nos compétences techniques et professionnelles, et il nous a préparés à la vie professionnelle.

Annexe A

Dans cette annexe, nous exposons les résultats complets de l'analyse modale, comme présentés dans le tableau ci-dessus :

Tableau VIII-I : Analyse modale complète.

Cas	N° Mode	Période (sec)	U _x	U _y	Somme U _x	Somme U _y	R _z	Somme R _z
Modal	1	0,657	3,71E-01	6,70E-03	0,3714	0,0067	3,00E-04	0,0003
Modal	2	0,512	6,60E-03	3,68E-01	0,3781	0,3744	1,28E-02	0,0131
Modal	3	0,322	6,88E-06	1,32E-02	0,3781	0,3876	3,22E-01	0,3349
Modal	4	0,163	3,78E-02	6,52E-02	0,4159	0,4528	1,00E-03	0,3359
Modal	5	0,159	1,01E-01	2,61E-02	0,5169	0,4789	3,20E-03	0,3391
Modal	6	0,123	1,00E-04	2,69E-02	0,517	0,5057	3,00E-04	0,3394
Modal	7	0,1	3,30E-03	7,23E-02	0,5202	0,578	2,04E-02	0,3598
Modal	8	0,095	8,39E-02	1,30E-03	0,6041	0,5793	9,97E-02	0,4594
Modal	9	0,088	2,00E-02	8,52E-02	0,6241	0,6645	7,20E-03	0,4666
Modal	10	0,085	1,19E-02	6,34E-02	0,6359	0,7279	4,70E-02	0,5136
Modal	11	0,074	1,18E-01	1,00E-03	0,7535	0,7289	1,60E-03	0,5151
Modal	12	0,072	0,00E+00	0,00E+00	0,7535	0,7289	0,00E+00	0,5151
Modal	13	0,071	1,96E-06	0,00E+00	0,7535	0,7289	0,00E+00	0,5151
Modal	14	0,07	0,00E+00	0,00E+00	0,7535	0,7289	0,00E+00	0,5151
Modal	15	0,07	1,00E-04	2,00E-04	0,7536	0,7292	0,00E+00	0,5151
Modal	16	0,07	0,00E+00	1,91E-06	0,7536	0,7292	0,00E+00	0,5151
Modal	17	0,07	8,00E-06	0,00E+00	0,7536	0,7292	6,34E-06	0,5151
Modal	18	0,069	2,90E-05	9,90E-03	0,7536	0,7391	1,00E-04	0,5152
Modal	19	0,069	1,00E-04	8,57E-07	0,7537	0,7391	9,04E-06	0,5152
Modal	20	0,069	0,00E+00	2,00E-04	0,7537	0,7393	1,84E-06	0,5152
Modal	21	0,069	1,46E-05	5,70E-07	0,7537	0,7393	9,44E-06	0,5152
Modal	22	0,069	1,21E-05	3,50E-03	0,7537	0,7427	4,21E-05	0,5153
Modal	23	0,069	4,74E-06	6,00E-04	0,7537	0,7434	6,32E-06	0,5153
Modal	24	0,069	6,18E-06	1,50E-03	0,7537	0,7449	1,45E-05	0,5153
Modal	25	0,069	9,00E-04	6,89E-06	0,7546	0,7449	4,00E-04	0,5157
Modal	26	0,068	7,00E-04	0,00E+00	0,7553	0,7449	2,00E-04	0,5158
Modal	27	0,068	7,00E-04	0,00E+00	0,7559	0,7449	1,00E-04	0,516
Modal	28	0,068	5,00E-04	1,00E-04	0,7564	0,745	4,00E-04	0,5163
Modal	29	0,068	2,00E-04	3,51E-06	0,7567	0,745	1,00E-04	0,5165
Modal	30	0,068	1,00E-03	4,38E-05	0,7577	0,745	7,00E-04	0,5172
Modal	31	0,068	8,12E-07	0,00E+00	0,7577	0,745	4,70E-06	0,5172
Modal	32	0,067	4,00E-04	4,50E-06	0,7581	0,745	1,00E-04	0,5173
Modal	33	0,067	4,00E-04	5,12E-06	0,7585	0,745	1,00E-04	0,5173
Modal	34	0,067	3,00E-04	2,00E-04	0,7588	0,7452	5,00E-04	0,5178
Modal	35	0,067	1,00E-04	2,00E-05	0,7589	0,7452	3,00E-04	0,5181
Modal	36	0,067	0,00E+00	3,87E-06	0,7589	0,7452	6,03E-06	0,5182
Modal	37	0,067	4,49E-06	2,02E-05	0,7589	0,7452	3,51E-05	0,5182
Modal	38	0,066	1,01E-06	1,16E-05	0,7589	0,7453	1,12E-05	0,5182
Modal	39	0,066	1,10E-05	2,70E-03	0,7589	0,7479	0,00E+00	0,5182
Modal	40	0,066	1,00E-04	3,00E-04	0,759	0,7482	6,00E-04	0,5188
Modal	41	0,066	4,89E-05	1,14E-02	0,7591	0,7597	1,00E-04	0,5189
Modal	42	0,065	6,30E-03	1,30E-05	0,7654	0,7597	7,40E-03	0,5263

Modal	43	0,064	6,40E-03	1,00E-04	0,7717	0,7598	2,00E-04	0,5265
Modal	44	0,06	1,50E-03	6,40E-03	0,7733	0,7661	2,38E-02	0,5503
Modal	45	0,059	1,45E-02	1,19E-02	0,7878	0,778	2,45E-02	0,5748
Modal	46	0,058	6,70E-03	4,05E-02	0,7945	0,8185	2,95E-02	0,6043
Modal	47	0,056	6,00E-04	3,90E-03	0,7951	0,8223	8,50E-03	0,6128
Modal	48	0,056	6,00E-04	7,80E-03	0,7957	0,8302	5,30E-03	0,6181
Modal	49	0,055	2,30E-03	7,80E-03	0,7981	0,838	4,00E-04	0,6185
Modal	50	0,055	2,00E-04	4,20E-03	0,7983	0,8423	3,35E-02	0,652
Modal	51	0,054	1,12E-02	3,10E-03	0,8095	0,8454	3,70E-03	0,6557
Modal	52	0,052	2,62E-02	1,00E-04	0,8357	0,8455	1,80E-03	0,6575
Modal	53	0,048	3,60E-03	1,00E-04	0,8394	0,8456	1,37E-02	0,6712
Modal	54	0,046	2,30E-02	9,00E-04	0,8623	0,8464	1,23E-01	0,7939
Modal	55	0,044	2,00E-04	0,00E+00	0,8625	0,8464	9,00E-04	0,7948
Modal	56	0,043	1,93E-05	1,00E-04	0,8625	0,8465	3,00E-04	0,7951
Modal	57	0,041	1,20E-03	2,20E-03	0,8637	0,8487	1,22E-02	0,8073
Modal	58	0,041	1,00E-04	7,30E-03	0,8638	0,856	5,00E-04	0,8078
Modal	59	0,04	0,00E+00	4,00E-04	0,8638	0,8564	8,66E-07	0,8078
Modal	60	0,039	2,00E-03	7,00E-04	0,8658	0,8571	2,84E-02	0,8363
Modal	61	0,038	1,00E-04	1,86E-05	0,8659	0,8571	2,40E-03	0,8386
Modal	62	0,037	1,00E-04	4,00E-04	0,866	0,8575	1,60E-03	0,8402
Modal	63	0,036	3,67E-05	2,60E-03	0,8661	0,8601	7,18E-06	0,8402
Modal	64	0,036	6,00E-04	5,00E-04	0,8667	0,8606	4,80E-05	0,8402
Modal	65	0,035	2,00E-04	1,20E-05	0,8669	0,8606	3,00E-04	0,8406
Modal	66	0,035	3,00E-04	1,62E-05	0,8672	0,8606	2,00E-04	0,8408
Modal	67	0,035	5,74E-06	1,50E-06	0,8672	0,8606	1,00E-04	0,8409
Modal	68	0,035	1,53E-05	1,00E-04	0,8672	0,8607	8,40E-07	0,8409
Modal	69	0,035	3,00E-04	5,47E-06	0,8676	0,8607	1,00E-04	0,8411
Modal	70	0,034	4,34E-05	1,22E-05	0,8676	0,8607	2,32E-05	0,8411
Modal	71	0,034	0,00E+00	1,44E-05	0,8676	0,8607	1,00E-04	0,8412
Modal	72	0,034	0,00E+00	4,51E-05	0,8676	0,8607	6,38E-06	0,8412
Modal	73	0,033	3,65E-05	1,20E-03	0,8676	0,862	1,00E-04	0,8413
Modal	74	0,033	2,37E-05	3,89E-05	0,8677	0,862	2,00E-04	0,8415
Modal	75	0,033	2,76E-06	3,41E-05	0,8677	0,8621	3,06E-06	0,8415
Modal	76	0,032	3,20E-03	1,00E-04	0,8709	0,8622	3,80E-03	0,8453
Modal	77	0,032	3,85E-05	1,82E-06	0,8709	0,8622	3,10E-03	0,8484
Modal	78	0,032	2,00E-04	4,00E-04	0,8711	0,8625	3,90E-03	0,8523
Modal	79	0,032	1,10E-03	2,00E-04	0,8722	0,8627	7,10E-03	0,8594
Modal	80	0,031	1,50E-03	1,00E-04	0,8737	0,8628	1,40E-03	0,8608
Modal	81	0,031	1,30E-03	1,00E-04	0,875	0,8629	3,00E-04	0,861
Modal	82	0,031	1,28E-02	1,00E-04	0,8878	0,863	2,00E-04	0,8613
Modal	83	0,03	6,00E-04	3,00E-04	0,8884	0,8633	5,00E-04	0,8618
Modal	84	0,03	2,53E-02	3,27E-06	0,9137	0,8633	3,90E-03	0,8657
Modal	85	0,029	4,00E-04	3,00E-04	0,9141	0,8636	3,91E-05	0,8658
Modal	86	0,029	5,39E-07	1,29E-02	0,9141	0,8764	2,27E-05	0,8658
Modal	87	0,028	1,40E-03	3,84E-05	0,9155	0,8765	6,00E-04	0,8664
Modal	88	0,028	2,00E-04	1,00E-04	0,9157	0,8765	1,00E-04	0,8665
Modal	89	0,027	1,86E-05	3,00E-04	0,9157	0,8768	0,00E+00	0,8665
Modal	90	0,027	5,00E-04	1,74E-02	0,9162	0,8943	1,00E-04	0,8666

Annexe B

L'extrait du rapport géotechnique suivant représente les caractéristiques géotechniques nécessaires à la classification du sol en catégorie S3 :

La vitesse moyenne de cisaillement « VS_{30} » au niveau du Ps3, du tir normal est représentée dans la figure suivante : $VS_{30}=245.4$ m/s.

La vitesse de l'onde de cisaillement nous a permis de classer le site en S3 « site meuble » pour une vitesse comprise $200 \leq V_s \leq 400$ m/s, à partir de dix (10m) de profondeur selon le règlement parasismique Algérien RPA99/VERSION 2003
Les dromochroniques des profils sismiques, les enregistrements et les photos sont portés aux annexes du présent document.

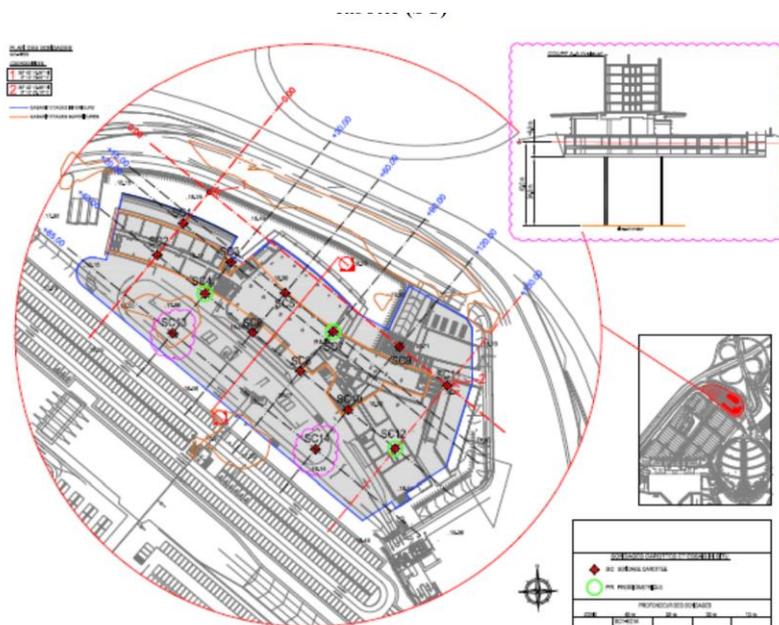
L.C.T.P (Laboratoire Central des Travaux Publics)			
Etabli le : 21/09/2016	Investigations géotechniques d'un hôtel en R+8+2 sous-sol-Dar El Beida-Alger	Direction des Etudes : SA/H.B/H.B	14/237

Annexe C

L'extrait du rapport géotechnique suivant représente l'implantation des sondages pressiométriques et sondages carottés de la structure :



Image Google montrant l'implantation des sondages pressiométrique (PR) et sondage carotté (SC)

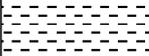


Plan d'implantation des sondages carottés (SC) et sondages pressiométrique (PR)

Annexe D

L'extrait du rapport géotechnique suivant représente la coupe géologique, ainsi que les résultats des essais mécaniques et les essais au laboratoire :

✓ **Sondage préssiométriques N° SP2 :**

Tableau récapitulatif		
Coupe géologique		
Profondeur	Lithologie	Nature
00 ^m 00 – 00 ^m 60		terre végétale
00 ^m 60 – 10 ^m 50		argile marneuse peu sableuse de couleur brunâtre.
10 ^m 50 – 20 ^m 00		argile marneuse, peu sableuse à inclusion graveleuse de couleur grise bariolée de beige.
20 ^m 00 – 25 ^m 50		dépôts alluvionnaires constitués de sable limono-argileux, très graveleux et caillouteux.
25 ^m 50 – 40 ^m 00		marne argileuse de couleur grise et beige

2 - Essais mécaniques :

2 - 1 - Essais de cisaillement à la boîte de Casagrande (NF P94-071-1) :

L'essai de cisaillement rectiligne consolidé, drainé (CD), qui est un essai à long terme, a donné les résultats suivants :

Légende :

C^* : Cohésion (Kg / cm²).

φ' : Angle de frottement interne en degré.

Tableau récapitulatif

Sondages N°	Profondeur (m)	Type d'essai	C' (bars)	ϕ' (°)
SC1	11.80-12.50	CD	0.21	24.30
	31.20-32.00	CD	0.36	22.50
SC2	03.40-03.90	CD	0.36	22.50
	14.30-15.00	CD	0.21	25.00
SC3	12.20-12.70	CD	0.34	21.90
SC4	14.20-15.20	CD	0.68	17.4
	38.00-38.70	CD	0.42	19.40
	35.20-35.80	CD	0.14	29.3
SC5	29.50-30.00	CD	0.15	31.00
SC6	30.40-31.00	CD	0.5	28.50
	33.40-33.90	CD	0.54	16.40
SC7	10.50-12.00	CD	0.25	23.90
	29.10-29.80	CD	0.31	20.90
SC8	12.80-13.40	CD	0.37	21.20
	23.50-23.95	CD	0.35	25.20
	36.00-36.40	CD	0.29	28.00
SC9	06.00-06.40	CD	0.18	26.00
	27.30-27.80	CD	0.31	20.90
SC10	35.40-36.00	CD	0.36	21.20
SC11	08.30-08.90	CD	0.09	22.80
	13.20-13.90	CD	0.18	20.10
SC12	04.70-05.30	CD	0.25	23.90
	34.00-34.50	CD	0.27	23.80

a- Résultats des essais d'identification

a. 1 – Humidité :

Légende :

ω : Teneur en eau (NF P94-050).

γ_h : Densité humide (NF P94-053).

γ_d : Densité sèche.

S_r : Degré de saturation

Sondages N°	Profondeur (m)	ω (%)	γ_h (t/m ³)	γ_d (t/m ³)	S_r (%)	Interprétation des résultats Selon la norme XP P 94-011
SC1	11.80-12.50	24.59	2.03	1.63	100	Sol dense, saturé
	31.20-32.00	24.59	2.14	1.71	100	Sol dense, saturé
SC2	03.40-03.90	23.89	2.04	1.64	100	Sol dense, saturé
	14.30-15.00	26.09	2.08	1.65	100	Sol dense, saturé
SC3	12.20-12.70	24.42	1.99	1.60	96	Sol dense, non saturé
SC4	14.20-25.00	24.05	2.03	1.64	100	Sol dense, saturé
	35.20-35.80	25.34	2.02	1.61	99.09	Sol dense, non saturé
	38.00-38.70	14.00	2.03	1.78	72.99	Sol dense, non saturé
SC5	11.00-12.00	25.62	2.03	1.62	100	Sol dense, saturé
	24.20-24.70	21.65	2.03	1.67	94.62	Sol dense, non saturé
	29.50-30.00	21.76	2.02	1.66	93.63	Sol dense, non saturé
SC6	30.40-31.00	20.21	2.14	1.78	100	Sol dense, saturé
	33.40-33.90	14.14	2.19	1.92	94	Sol très dense, non saturé
SC7	10.50-12.00	24.53	2.01	1.61	98	Sol dense, non saturé
	29.10-29.80	21.29	2.10	1.73	100	Sol dense, saturé

Références Bibliographiques

1. D.T.R-B.C.2.2 : « Charges permanentes et charges d'exploitations ».
2. D.T.R-B.C.2-41 : « Règles De Conception Et De Calcul Des Structures En Béton Armé C.B.A.93 » .
3. D.T.R-B.C.2-48 : « Règles Parasismiques Algériennes RPA99/VERSION 2003 ».
4. EUUROCODE CALCUL DES STRUCTURES EN BETON.
5. REGLES BAEL 91 REVISEES 91.
6. MANUAL ETABS V20.
7. MANUEL BIM THEORIE ET APPLICATIONS.
8. AUTODESK REVIT STRUCTURE FUNDAMENTALS.
9. BIM ET MAQUETTE NUMERIQUE.
10. REVIT POUR LE BIM.
11. CSiXRevit MANUAL.
12. AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS MANUAL.
13. INTEGRATING AUTODESK REVIT, REVIT STRUCURE, AND ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS PROFESSIONNAL.