Application du BIM dans le cycle de vie d'un projet de bâtiment : du dimensionnement structurel à l'Optimisation du planning et des coûts (BIM 4D/5D) : Cas d'étude d'un bâtiment R+5 à Abidjan

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE

MASTER

SPÉCIALITÉ : Génie Civil – Bâtiment et Travaux Publics

Présenté et soutenu publiquement le 21/07/2026 par

Kader Lewi OUATTARA 20230311

Directeur de mémoire : Dr Abdou LAWANE GANA, Maître de conférences (CAMES), Enseignant-chercheur, Institut 2iE

Encadrant : Dr Arnaud OUEDRAOGO, Maître-Assistant (CAMES), Enseignant-chercheur, Institut 2iE

Maître de stage : M. Abou COULIBALY, Ingénieur Génie Civil, à B2E Concept

Structure d'accueil : B2E Concept

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr (MC) Daniel YAMEGUEU NGUEWO

Membres et correcteurs : Dr Césaire HEMA

Dr Decroly DJOUBISSIE DENOUWE

Promotion 2025-2026

DEDICACE

Je dédie ce mémoire :

À ALLAH Tout-Puissant, source de la grâce, de la santé, de la force et de la persévérance qu'il m'a accordées tout au long de mon parcours académique.

À Monsieur et Madame OUATTARA, mes parents ainsi qu'à Monsieur PARE dont les sacrifices, les encouragements et le soutien inconditionnel ont permis la réalisation de mes études. Toujours vous m'avez fait confiance et m'avez transmis vos valeurs du travail, de la discipline et de la persévérance.

À mes frères et sœurs pour leur affection, leur soutien moral, leur confiance inébranlable.

À tous mes professeurs qui ont contribué à mon éducation intellectuelle et professionnelle.

À tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à mon succès et m'ont soutenu.

Je vous remercie du plus profond du cœur.

REMERCIEMENTS

Ce mémoire n'aurait pas pu être réalisé sans le concours de nombreuses personnes à qui j'exprime ma sincère reconnaissance.

Je tiens tout d'abord à remercier le Directeur de mémoire, Dr Abdou LAWANE GANA, pour son encadrement scientifique, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements à Dr Arnaud OUEDRAOGO, Encadrant académique, pour son accompagnement, ses remarques pertinentes et son exigence scientifique qui ont permis d'améliorer ce mémoire.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur Abou COULIBALY, Maître de stage, pour son accueil en entreprise, sa disponibilité, son accompagnement professionnel et les connaissances pratiques qu'il m'a transmises pendant la durée du stage.

Je tiens également à remercier tout le personnel de B2E Concept pour leur collaboration, leur esprit d'équipe et leur accompagnement dans la réalisation des différentes activités liées à ce projet.

Je remercie l'ensemble du corps enseignant et administratif de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) pour la qualité de la formation reçue et les conditions d'apprentissage mises à notre disposition.

Enfin, je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à ma famille, à mes amis et à mes camarades de promotion pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur confiance tout au long de cette aventure académique.

Je prie tous ici présents d'accepter l'expression de ma profonde reconnaissance.

RESUME

Dans le secteur de la construction ivoirien, on retrouve souvent des problèmes de dépassement des délais, de dépassement des coûts et de coordination interdisciplinaire difficile. Dans ce contexte, le Building Information Modeling (BIM) se présente comme une méthode innovante pour moderniser la gestion globale des projets de construction. Ce mémoire traite de l'application intégrée de la méthodologie BIM 4D/5D, associée au dimensionnement structurel (BAEL 91 révisé 99), d'un immeuble résidentiel R+5 à Abidjan-Bingerville, effectué au sein du bureau d'études B2E Concept. La méthodologie a consisté à réaliser une modélisation 3D sous Revit (LOD 300), à détecter les conflits sous Navisworks, à effectuer une descente de charges et un calcul de ferraillage sous Robot Structural Analysis, ainsi qu'à réaliser une planification temporelle 4D (MS Project/Navisworks) et une estimation budgétaire 5D. Les résultats soulignent l'efficacité de l'approche BIM par rapport aux méthodes classiques. L'analyse 5D montre que le coût total estimé avec la méthode BIM est de 156 189 823 FCFA, contre 168 854 903 FCFA obtenus à partir d'un métré manuel 2D réalisé dans le cadre de cette étude. L'écart global maîtrisé à 12 665 080 FCFA (soit 8,11 %) témoigne de la fiabilité de l'extraction automatique des quantités, éliminant les risques de double comptage et d'omission, particulièrement sur les éléments répétitifs (maçonneries et planchers) où les variations atteignent jusqu'à 9 %. En termes de délais (BIM 4D), la simulation dynamique a permis d'optimiser l'enchaînement des tâches sur le chemin critique (des fondations à la structure du R+5) et de corriger en amont les conflits d'interfaces spatiales entre le gros œuvre et les lots techniques, ce qui a validé l'hypothèse d'une réduction effective des interruptions de chantier. Enfin, la détection des conflits (clash detection) a permis d'améliorer considérablement la coordination interdisciplinaire en résolvant les incohérences géométriques dès la phase de conception. Ce travail montre que le BIM est une approche viable pour les projets de construction en Côte d'Ivoire et met en évidence son potentiel pour améliorer la coordination des intervenants, la maîtrise des coûts et des délais. Il propose également des recommandations stratégiques pour favoriser son adoption progressive par les bureaux d'études et les entreprises locales.

Mots-clés : BIM 4D/5D, bâtiment R+5, dimensionnement structurel, Navisworks , extraction des quantités, LOD, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

The construction sector in Côte d'Ivoire faces recurring challenges related to schedule delays, cost overruns, and poor coordination among project stakeholders. In this context, Building Information Modeling (BIM) has emerged as an innovative process to modernize the overall management of construction projects. This thesis focuses on the integrated application of the BIM 4D/5D methodology, combined with structural design according to BAEL 91 Revised 99, for a residential R+5 building located in Abidjan-Bingerville, carried out within the engineering consultancy firm B2E Concept. The implemented methodology consisted of developing a 3D model using Revit (LOD 300), performing clash detection in Navisworks, carrying out load takeoff and reinforcement design in Robot Structural Analysis, as well as developing a 4D time planning simulation (MS Project/Navisworks) and a 5D cost estimation.

The results highlight the effectiveness of the BIM approach compared with conventional methods. The 5D analysis shows that the total estimated cost using the BIM method is 156,189,823 FCFA, compared with 168,854,903 FCFA obtained from a manual 2D quantity takeoff carried out as part of this study. The controlled overall difference of 12,665,080 FCFA (8.11%) demonstrates the reliability of automated quantity extraction by eliminating the risks of double counting and omissions, particularly for repetitive elements such as masonry and floor slabs, where variations reached up to 9%. Regarding schedule management (BIM 4D), the dynamic simulation optimized the sequence of tasks along the critical path, from the foundations to the R+5 superstructure, and enabled the early resolution of spatial interface conflicts between structural works and technical trades, confirming the hypothesis of an effective reduction in construction site interruptions. Finally, clash detection significantly improved interdisciplinary coordination by resolving geometric inconsistencies during the design phase. This study demonstrates that BIM is a viable approach for construction projects in Côte d'Ivoire and highlights its potential to improve stakeholder coordination, cost control, and schedule management. It also provides strategic recommendations to support its progressive adoption by local engineering consultancies and construction companies.

Keywords: BIM 4D/5D, R+5 building, structural design, Navisworks, quantity takeoff, LOD, Côte d'Ivoire.

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACE ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME iv

ABSTRACT v

TABLE DES MATIÈRES vi

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES xi

LISTE DES FIGURES xiii

LISTE DES TABLEAUX xiv

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL ET PRÉSENTATION DU PROJET 3

I.1 La ville d'Abidjan et le secteur de la construction 3

I.1.1 Croissance urbaine et demande en bâtiments 3

I.1.2. Difficultés récurrentes des projets de construction 4

I.1.2.1. Dépassements de délais et surcouts 4

I.1.2.2. Incohérences entre études et exécution 4

I.1.3. Le numérique comme levier de modernisation 4

I.2. Présentation de la structure d'accueil : B2E Concept 5

I.2.1. Objectifs du stage au sein de B2E Concept 6

I.2.3.2. Organisation 6

I.2.3.3. Projets Réalisés et Références 7

I.3. Présentation du projet d'étude : bâtiment R+5 à Abidjan 7

I.3.1. Contexte et justification du projet 7

I.3.2. Localisation et analyse du site 8

I.3.3. Données architecturales de base 8

I.3.4. Données d'entrée fournies par B2E Concept 9

I.3.4.1. Analyse des plans architecturaux 9

I.3.4.2. Contraintes techniques et géotechniques 9

I.3.5. Caractéristiques des matériaux retenus 10

I.4. CADRE DE L'ETUDE 11

I.4.1. Problématique centrale de l'étude 11

I.4.2. Question de recherche 11

I.4.3. Objectif général 12

I.4.4. Objectifs spécifiques 12

I.4.4.1. Objectif spécifique 1 Modélisation BIM 3D 12

I.4.4.2. Objectif spécifique 2 12

I.4.4.3. Objectif Spécifique 3 Planification BIM 4D 12

I.4.4.4. Objectif Spécifique 4 Estimation des couts BIM 5D 12

I.4.4.5. Objectif spécifique 5 Analyse comparative BIM / méthode Traditionnel 13

I.5. Hypothèses de travail 13

I.5.1. Hypothèse 1 Reduction des délais d'exécution 13

I.5.2. Hypothèse 2 Amélioration de la précision budgétaire 13

I.5.3. Hypothèse 3 Amélioration de la coordination entre acteurs 13

CHAPITRE II. REVUE DE LA LITTERATURE 15

II.1. Le Building Information Modeling (BIM) 15

II.1.1. Définition et évolution historique du BIM 15

II.1.2. Principes fondamentaux du BIM 16

II.1.2.1. La maquette numérique BIM 16

II.1.3. Les dimensions du BIM 17

II.1.3.1. Représentation géométrique et coordination spatiale 17

II.1.3.2. BIM 4D Dimension temporelle 19

II.1.3.3. BIM 5D Dimension économique 19

II.1.4. Autres dimensions du BIM 20
II.2. Adoption du BIM dans le monde et en Afrique subsaharienne 20
II.3. Facteurs influençant l'adoption du BIM 21
a) Les contraintes économiques 21
b) Le manque de compétences BIM 22
c) L'absence de normes et de cadres réglementaires 22
II.4. Situation du BIM en Afrique subsaharienne 22
II.5. Contexte ivoirien et justification de l'étude 23
II.6. Intégration BIM-Calcul Structurel : interopérabilité 24
II.7. Planification et Estimation de coûts par le BIM 24
II.7.1. BIM 4D : simulation temporelle et optimisation du planning 24
II.7.2. BIM 5D : extraction des quantités et maîtrise budgétaire 25
CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES 27
III.1 Outils et logiciels utilisés 27
III.1.1. Logiciel BIM de modélisation 27
III.1.2. Logiciel de Calcul Structurel 27
III.1.3. Logiciel de planification 4D 28
III.1.4. Logiciel d'estimation 5D 28
III.2. Démarche de modélisation BIM 3D 29
III.2.1. Protocole de modélisation sous Revit 29
III.2.2. Détection des conflits 29
III.3. Démarche de dimensionnement structurel 29
III.3.1. Descente de charges 29
III.3.2. Dimensionnement des éléments porteurs 30
III.3.2.1. Dalles 30
III.3.2.2. Poutres 30

III.3.2.3. Poteaux 31

III.3.2.4. Fondations 31

III.4. Démarche de planification BIM 4D 31

III.4.1. Décomposition des tâches (WBS) 31

III.4.2. Planning Gantt et chemin critique 31

III.4.3. Simulation 4D sous Navisworks 31

III.5. Démarche d'estimation BIM 5D 32

III.5.1. Extraction des quantités depuis Revit 32

III.5.2. Élaboration du BQE sous Excel 32

III.6. Protocole de l'analyse comparative BIM / méthodes traditionnelles 32

CHAPITRE IV. PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS 33

IV.1. Résultats de la modélisation BIM 3D 33

IV.1.1. Maquette numérique Architecturale du bâtiment R+5 33

IV.1.2. Maquette numérique structurelle du bâtiment R+5 33

IV.2. Résultats du dimensionnement structurel 34

IV.2.1. Descente de charges 34

IV.2.2. Dimensionnement des dalles 37

IV.2.3. Dimensionnement des poutres 38

IV.2.4. Dimensionnement des poteaux 39

IV.2.5. Modèle Analytique 40

IV.3. Résultats de la planification BIM 4D 41

IV.3.1. Structure WBS et durées 42

IV.3.2. Chemin critique et durée totale 43

IV.3.3. Simulation 4D 44

IV.4. Résultats de l'estimation BIM 5D 46

IV.4.1. Quantités extraites depuis Revit 46

IV.4.2. Bordereau Quantitatif et Estimatif (BQE) 46

IV.5. Analyse comparative BIM versus méthodes traditionnelles 48

IV.5.1. Comparaison sur les délais (vérification de H1) 49

Vérification de H1 50

V.5.2. Comparaison sur la précision budgétaire (vérification de H2) 51

Vérification de H2 51

IV.5.3. Analyse de la coordination (vérification de H3) 51

Vérification de H3 52

CHAPITRE V. DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS 53

V.1. Discussion des résultats 53

V.1.1. Modélisation BIM 3D 53

V.1.2. Dimensionnement structurel 53

V.1.3. BIM 4D 54

V.1.4. BIM 5D 54

V.2. Recommandations 54

V.2.1. Pour B2E Concept 54

V.2.2. Pour le secteur de la construction 55

V.2.3. Perspectives 56

CONCLUSION GÉNÉRALE 57

BIBLIOGRAPHIE 58

ANNEXES 61

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

2D / 3D / 4D / 5D / 6D / 7D : Deuxième, Troisième, Quatrième, Cinquième, Sixième et Septième dimensions du BIM, représentant respectivement la géométrie plane, la modélisation volumique, la planification temporelle, la gestion des coûts, le développement durable et la gestion du cycle de vie de l'ouvrage.

B2E Concept : Bureau d'Études et d'Ingénierie B2E Concept.

BAEL : Béton Armé aux États Limites (Règles BAEL 91 révisées 99)

BIM : Building Information Modeling (Modélisation des informations du bâtiment).

BTP : Bâtiment et travaux publics.

CAO / DAO : Conception Assistée par Ordinateur / Dessin Assisté par Ordinateur.

CR : compte rendu.

CVC : Chauffage, Ventilation et Climatisation.

DQE : devis quantitatif et estimatif.

ELS : État Limite de Service.

ELU : État Limite Ultime.

EN : Norme européenne (notamment les Eurocodes).

HA : Acier à haute adhérence employé dans les constructions en béton armé.

IFC : Industry Foundation Classes, format d'échange ouvert et normalisé pour une interopérabilité entre logiciels BIM.

LIA: Academia Internacional de Líderes.

LOD : Niveau de Développement de la maquette numérique.

MS Project : logiciel de planification et de gestion de projets Microsoft Project.

PEX : Polyéthylène Réticulé, utilisé pour les réseaux d'alimentation en eau.

PND : Plan National de Développement de la Côte d'Ivoire.

PVC : polychlorure de vinyle, utilisé pour les réseaux d'évacuation des eaux.

QGIS : Quantum Geographic Information System, système d'information géographique libre.

RDC : Rez de Chaussée

R+5 : Bâtiment sur cinq niveaux en plus le rez-de-chaussée.

RL : Acier rond lisse, couramment utilisé pour les charpentes, les étriers et les épingles en béton armé.

RSA : Robot Structural Analysis, logiciel d'analyse et de calcul des structures développé par Autodesk.

SIG : Système d'Information Géographique.

VRD : Voirie et Réseaux Divers (voiries, assainissement, eau potable, réseaux électriques et télécoms).

WBS : Work Breakdown Structure

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Organisation de B2E Concept 6

Figure 2: Localisation du Projet 8

Figure 3 : Vues Maquette 3D 33

Figure 4 : Vue 3D Maquette Structurale 34

Figure 5 : Cartographie de dalle 38

Figure 6 : Sollicitations des poutres 38

Figure 7 : Plan de ferraillage de poutre 39

Figure 8 : Résultats des efforts sur poteaux 39

Figure 9 : Plan de Ferraillage de poteaux 40

Figure 10 ; Modèle Analytique ROBOT -REVIT 40

Figure 11 : Planning après liaison MS PROJECT- NAVISWORK 41

Figure 12 : Importation des Maquettes dans Navisworks 42

Figure 13 : Extrait de Planning sous Ms Project 43

Figure 14 : Début de Fondation 45

Figure 15 : Processus de construction 45

Figure 16 : Etape finale 45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Listes des Projets de references 7

Tableau 2: Données Architecturales 8

Tableau 3: Caractéristiques des Matériaux 10

Tableau 4 : Logiciel pour l'estimation 28

Tableau 5:Prédimensionnement de Poutres 34

Tableau 6: Prédimensionnement de Poteaux 35

Tableau 7 : Descente de charges sur Poteau 35

Tableau 8:Extraction de quantités 46

Tableau 9 :DQE réalisé avec Extraction de Quantité 46

Tableau 10 : DQE réalisé avec les plans 2D 48

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La croissance démographique et l'urbanisation accélérée des métropoles d'Afrique subsaharienne entraînent une augmentation continue des besoins en infrastructures et en logements. D'après les Nations Unies, plus de 60 % de la population africaine devrait vivre en zone urbaine d'ici 2050, ce qui accentue la pression sur les secteurs du bâtiment et des travaux publics [1]. En Côte d'Ivoire, et particulièrement à Abidjan, cette dynamique se traduit par une forte demande en bâtiments résidentiels et tertiaires de moyenne et grande hauteur. Avec plus de six millions d'habitants, Abidjan constitue aujourd'hui le principal pôle économique et urbain du pays [2].

Cette évolution s'accompagne toutefois de nombreuses difficultés dans la conduite des projets de construction, notamment les retards d'exécution, les dépassements de coûts et les insuffisances de coordination entre les différents intervenants. Ces contraintes réduisent la performance globale des projets et mettent en évidence les limites des méthodes traditionnelles de conception, de planification et de gestion des travaux. Plusieurs études montrent que la fragmentation des informations et les défauts de communication figurent parmi les principales causes de ces dysfonctionnements [3].

Dans ce contexte, le Building Information Modeling (BIM) apparaît comme une approche innovante permettant de centraliser l'ensemble des informations d'un projet au sein d'une maquette numérique unique. En intégrant les dimensions 3D, 4D et 5D, le BIM favorise la collaboration entre les acteurs, améliore la planification des travaux et renforce la maîtrise des coûts tout au long du cycle de vie d'un ouvrage.

Malgré ces avantages, l'adoption du BIM demeure encore limitée en Afrique subsaharienne, en raison notamment du coût des logiciels, du manque de formation spécialisée, de l'absence de standards nationaux et d'une maturité numérique encore faible des acteurs du secteur [4]. En Côte d'Ivoire, les études scientifiques portant sur l'application du BIM aux projets de bâtiment restent encore peu nombreuses, ce qui justifie la réalisation de travaux adaptés au contexte local.

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent mémoire, intitulé « Application du BIM dans le cycle de vie d'un projet de bâtiment : du dimensionnement structurel à l'optimisation du planning et des coûts (BIM 4D/5D). Cas d'étude d'un bâtiment R+5 à Abidjan ». Réalisée au sein du bureau d'études B2E Concept, cette étude vise à évaluer l'apport d'une démarche BIM intégrant la modélisation 3D, le dimensionnement structurel, la planification 4D et l'estimation

des coûts 5D, en comparaison avec les méthodes traditionnelles, afin d'améliorer la coordination, la maîtrise des délais et la précision budgétaire des projets de bâtiment.

Le mémoire est structuré en cinq chapitres. Le premier chapitre présente le contexte de l'étude, la structure d'accueil, le projet étudié ainsi que le cadre scientifique de la recherche. Le deuxième chapitre est consacré à la revue de littérature portant sur le BIM, le dimensionnement des structures et les principaux travaux relatifs au BIM 4D/5D. Le troisième chapitre décrit la méthodologie adoptée, depuis la modélisation BIM jusqu'au dimensionnement structurel, à la planification 4D, à l'estimation des coûts 5D et à l'analyse comparative avec la méthode traditionnelle. Le quatrième chapitre présente et analyse les résultats obtenus. Enfin, le cinquième chapitre regroupe la conclusion générale, les recommandations formulées et les perspectives de cette étude.

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL ET PRÉSENTATION DU PROJET

Ce chapitre présente le cadre général dans lequel s'inscrit le présent mémoire de fin d'études. Il expose dans un premier temps le contexte urbain de la ville d'Abidjan et les défis récurrents du secteur de la construction en Côte d'Ivoire, puis présente la structure d'accueil B2E Concept ainsi que le projet d'étude, un immeuble résidentiel de type R+5 localisé à Abidjan Bingerville.

La réalisation d'un mémoire de fin d'études en ingénierie nécessite un ancrage solide dans le contexte professionnel réel, permettant d'articuler les acquis théoriques avec les exigences pratiques du terrain. Le présent chapitre a pour objet de situer cette étude dans son environnement géographique, économique et institutionnel. Il présente successivement le contexte urbain et sectoriel d'Abidjan, la structure d'accueil qui a encadré le stage, puis le projet d'étude retenu comme cas d'application.

I.1 La ville d'Abidjan et le secteur de la construction

I.1.1 Croissance urbaine et demande en bâtiments

Abidjan est la capitale économique de la Cote d'Ivoire et la métropole la plus peuplée d'Afrique de l'Ouest francophone. Avec une population estimée à plus de 6,3 millions d'habitants en 2023 selon l'Institut National de la Statistique [5], la ville connait depuis plusieurs décennies une croissance démographique soutenue, portée par un solde migratoire positif et un taux de fécondité élevée. Cette dynamique démographique se traduit par une pression croissante sur le parc immobilier existant et une demande structurelle en logements neufs particulièrement forte.

Sur le plan économique, Abidjan concentre près de 70% du tissu industriel et commercial ivoirien [6] et constitue le principal pôle d'attraction des investissements étrangers dans la sous-région. Cette concentration d'activités génère une demande soutenue de bâtiment à usage mixte, résidentiel et tertiaire, notamment des immeubles de moyenne hauteur de type R+3 à R+7, qui constituent le segment le plus dynamique du marché de la construction en milieu urbain.

Selon le Plan National de Développement (PND) 2021-2025, les besoins en logements urbains en Côte d'Ivoire sont estimés à environ 500 000 unités, avec une croissance annuelle de la demande de l'ordre de 10 %. Le déficit est particulièrement marqué à Abidjan, où il dépasse 20 000 logements par an[7].

I.1.2. Difficultés récurrentes des projets de construction

Malgré la vitalité du secteur, la réalisation des projets de construction à Abidjan reste confrontée à des difficultés structurelles qui affectent leur performance globale. Ces difficultés, largement documentées dans la littérature scientifique et les rapports techniques consacrés au secteur de la construction, se manifestent principalement par des dépassements de délais, des surcoûts, ainsi que des insuffisances de coordination entre les différents intervenants du projet [8]

I.1.2.1. Dépassements de délais et surcouts

Les dépassements de délais et les surcoûts constituent des difficultés récurrentes dans les projets de construction. Ils résultent généralement d'une planification insuffisante, des modifications de conception en cours d'exécution, des erreurs de quantification, des difficultés d'approvisionnement en matériaux et d'une coordination insuffisante entre les différents intervenants du projet.

La fragmentation des informations entre les acteurs du projet constitue l'une des principales causes d'inefficacité dans l'industrie de la construction [9]. Dans le contexte ivoirien, ces contraintes peuvent affecter la maîtrise des coûts et des délais, soulignant ainsi la nécessité d'adopter des outils numériques favorisant une meilleure coordination et un suivi plus efficace des projets.

I.1.2.2. Incohérences entre études et exécution

Une difficulté réside dans les incohérences fréquentes constatées entre les dossiers d'études et les conditions réelles d'exécutions sur chantier. Ces incohérences résultent d'un processus de conception encore largement séquentiel et compartimenté, dans lequel les études architecturales, structurelles, techniques et économiques sont menées de manière indépendante ; par des intervenants distincts, sans plateforme d'échange d'informations commune.

Cette fragmentation du processus engendre des conflits de coordination entre les différents corps d'état gros œuvre, second œuvre, réseaux qui se révèlent souvent tardivement, en phase d'exécution, lorsque les corrections sont plus couteuses et plus longues à mettre en œuvre. Les erreurs de métrés, les omissions dans les descriptifs et les contradictions entre plans sont autant de manifestations concrètes de cette défaillance organisationnelle.

I.1.3. Le numérique comme levier de modernisation

Face à ces défis, la transformation numérique du secteur du bâtiment constitue un levier de modernisation reconnu à l'échelle internationale. En Côte d'Ivoire, la Stratégie Nationale de

l'Économie Numérique (SN2025) identifie le BTP comme l'un des secteurs prioritaires pour l'adoption des technologies numériques, aux côtés de la santé et de l'éducation.

Le Building Information Modeling (BIM), qui constitue le cœur de cette étude, représentes-en ce sens une rupture méthodologique majeure par rapport aux pratiques traditionnelles. Il permet en effet de fédérer l'ensemble des informations d'un projet architecturales, structurelles, techniques et économiques au sein d'une maquette numérique unique, accessible à tous les acteurs du projet tout au long du son cycle de vie. L'adoption progressive du BIM par les bureaux d'études ivoiriens, encore embryonnaire mais en progression, témoigne d'une prise de conscience croissante des gains potentiels qu'il offre en matière de qualité, de délais et de couts.

I.2. Présentation de la structure d'accueil : B2E Concept

B2E Concept (Bureau d'Étude et d'Exécution Travaux Bâtiment) est une entreprise ivoirienne spécialisée dans les études techniques, l'exécution et le suivi des projets de construction. Créée en 2023 et basée à Abidjan, elle intervient principalement dans le domaine du bâtiment, à travers des missions allant de la conception à la réalisation des ouvrages.

L'entreprise est dirigée par M. Abou COULIBALY, ingénieur en Génie Civil, et s'appuie sur une organisation structurée autour de trois principaux pôles : le Bureau d'Études Techniques, la Direction des Travaux et la Direction Administrative et Financière.

Ses principales activités concernent :

- les études architecturales et techniques ;
- le dimensionnement des structures ;
- la planification et le suivi des travaux ;
- l'exécution des travaux de gros œuvre et second œuvre ;
- les études et travaux liés aux infrastructures.

Dans le cadre de son développement, B2E Concept s'intéresse progressivement à l'intégration des outils numériques dans ses processus de travail, notamment à travers l'utilisation de méthodes BIM visant à améliorer la coordination, la planification et la maîtrise des coûts des projets.

I.2.1. Objectifs du stage au sein de B2E Concept

Le stage de fin d'études a été réalisé au sein du service **Ordonnancement, Pilotage et Coordination (OPC)** sous la supervision du chef de projet. Il avait pour objectifs principaux :

- participer au suivi et à la coordination des travaux ;
- contribuer à l'élaboration des documents de planification et de suivi ;
- participer aux études quantitatives et estimatives des projets ;
- analyser l'apport d'une démarche BIM 4D/5D dans l'amélioration de la gestion des projets de construction

I.2.3.2. Organisation

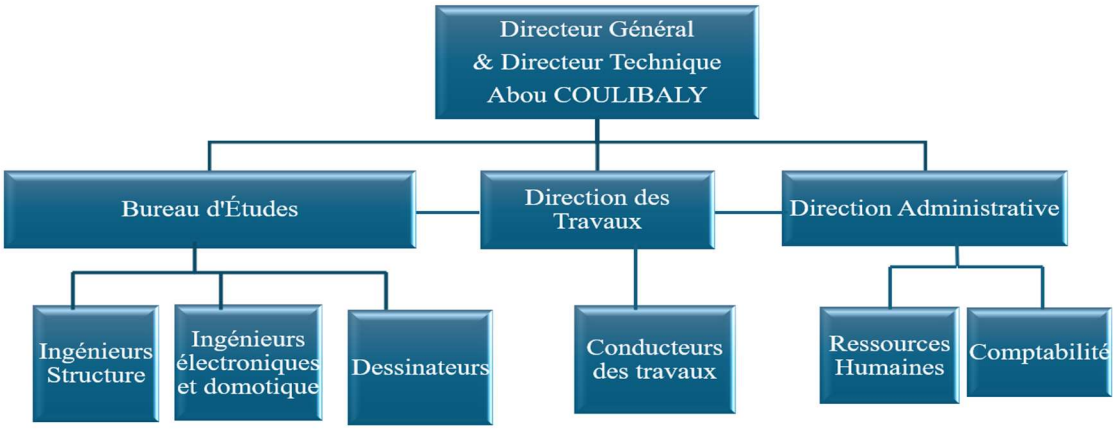


Figure 1 : Organisation de B2E Concept

Sur le plan des ressources matérielles, B2E Concept dispose d'un parc d'équipements adapté à la conduite de ses activités de chantier, comprenant notamment trois bétonnières, une grue, quatre motopompes, cinq niveaux laser 3D, quatre cents étais, quatre-vingt-sept poutrelles, ainsi qu'un parc informatique de onze postes de travail et deux imprimantes grand format (A3/A4). Ces moyens permettent à l'entreprise d'assurer une exécution autonome et conforme aux exigences techniques de ses projets.

I.2.3.3. Projets Réalisés et Références

Depuis sa création, B2E Concept a réalisé plusieurs projets de bâtiments en Côte d'Ivoire, notamment des immeubles résidentiels et tertiaires. Parmi ces réalisations figurent :

Tableau 1: Listes des Projets de references

Projets	Clients	Missions
CRYSTAL R+4	CIPROMEX	Finition tous corps d'état
ATM Informatique R+4	ATM Informatique	Finition tous corps d'état
LIGHT PUZZLE R+7	Triangle d'Or	Finition tous corps d'état
Résidence BAHIA R+7	E2ITB	CFO/CFA et plomberie
Villas Duplex haut standing	FAOCONSEIL	Construction complète

Les projets CRYSTAL R+4 et ATM Informatique R+4, suivis durant le stage OPC, constituent les principales références exploitées dans ce mémoire. Ils illustrent l'expérience de B2E Concept dans la gestion de projets de bâtiments multi-étages et l'intérêt de l'intégration du BIM 4D/5D dans le processus de construction.

I.3. Présentation du projet d'étude : bâtiment R+5 à Abidjan

I.3.1. Contexte et justification du projet

Le projet d'étude retenu dans le cadre de ce mémoire est un immeuble à usage résidentiel de type Rez-de-chaussée + 5 étages (R+5), développé par B2E Concept pour le compte d'un maître d'ouvrage privé. Ce type d'ouvrage représente une typologie courante dans les projets immobiliers urbains à Abidjan, combinant des exigences fonctionnelles et des contraintes structurelles adaptées à l'application d'une démarche BIM 4D/5D. Son choix comme cas d'étude permet ainsi d'évaluer l'apport du BIM dans la modélisation, la coordination, la planification et l'estimation des coûts d'un projet réel de construction

Sur le plan structurel, un bâtiment R+5 en béton armé constitue un projet suffisamment complexe pour justifier une étude approfondie de dimensionnement et de modélisation. Il reste toutefois accessible aux moyens techniques d'un bureau d'études classique. Il représente donc un cadre approprié pour analyser l'apport du BIM dans la conception des structures.

I.3.2. Localisation et analyse du site

Le projet est situé à Abidjan, sur un terrain situé dans une zone en cours d'urbanisation et accessible depuis les principales voies de circulation. L'analyse du site a mis en évidence les principales contraintes influençant la conception du projet, notamment la configuration de la parcelle, les conditions d'accès au chantier, l'environnement bâti et les exigences du Plan d'Urbanisme Directeur (PUD). Ces éléments ont été pris en compte dans les choix de conception et de dimensionnement.

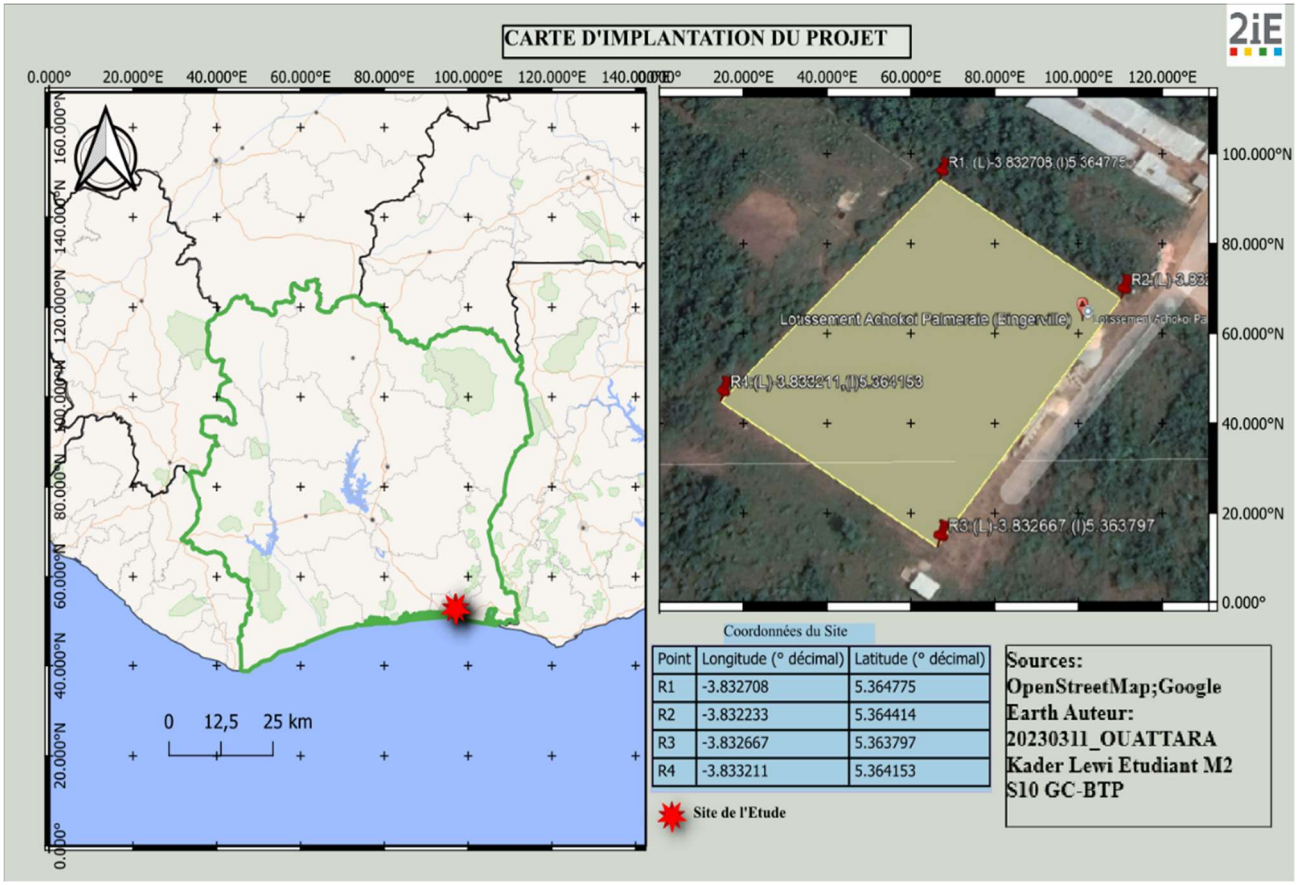


Figure 2 : Localisation du Projet

I.3.3. Données architecturales de base

Le programme architectural du bâtiment R+5 a été défini par le maitre d'ouvrage en concertation avec l'équipe de conception de B2E Concept. Il prévoit un immeuble à usage exclusivement résidentiel organisé autour d'une trame structurelle régulière favorable à la mise en œuvre de la méthodologie BIM. Les principales caractéristiques architecturales du bâtiment sont résumées dans le tableau ci-après.

Tableau 2: Données Architecturales

Caractéristique	**Valeur**
Localisation	Bingerville (Abidjan)
Destination	Immeuble résidentiel
Nombre de niveaux	R+5
Hauteur totale	22,4 m
Surface d'emprise	710 m²
Surface bâtie totale	560 m²
Nombre d'appartements	20
Système porteur	Ossature en béton armé
Type de planchers	Dalles à corps creux; Dalle pleine (Balcon)
Toiture	Terrasse non accessible
Fondation	Semelles isolées

I.3.4. Données d'entrée fournies par B2E Concept

I.3.4.1. Analyse des plans architecturaux

B2E Concept a mis à ma disposition l'ensemble des plans architecturaux du projet, comprenant les plans de masse, les plans de chaque niveau. Une analyse de ces documents a permis de proposer des apports tel que : un ascenseur, une nouvelle disposition des baies, d'identifier la trame structurelle principale, la disposition des éléments porteurs verticaux (portaux et voiles), la géométrie des planchers et l'organisation des circulations verticales.

Cette phase d'analyse des plans constitue l'étape préalable indispensable à toute modélisation BIM de qualité. Elle a conduit à l'identification de plusieurs points de vigilance concernant la cohérence géométrique des plans et la compatibilité entre les hypothèses architecturales et les contraintes structurelles, qui seront développés dans le Chapitre IV relatif à la méthodologie de modélisation.

I.3.4.2. Contraintes techniques et géotechniques

Les contraintes techniques du projet ont été définies à partir des données fournies par B2E Concept et des caractéristiques générales des sols rencontrés dans la région d'Abidjan. À ce stade de l'étude, aucun rapport géotechnique spécifique au site n'était disponible.

Dans ce contexte, le prédimensionnement des fondations a été réalisé en retenant une contrainte admissible du sol de **σadm = 0,20 MPa**, correspondant à l'hypothèse de travail fournie par B2E Concept. Cette valeur a été adoptée pour les besoins de l'avant-projet, en l'absence de résultats d'investigations géotechniques.

Les vérifications des fondations ont été effectuées à l'aide du module de calcul des fondations, configuré selon les règles du DTU . Cette démarche est adaptée au cadre de l'étude et permet d'obtenir un dimensionnement préliminaire cohérent.

Cette hypothèse demeure provisoire et devra être remplacée par les paramètres issus de l'étude géotechnique du site avant le dimensionnement définitif des fondations.

Tableau 3 : Caractéristiques des Matériaux

Matériaux	**Paramètres**	**Valeur retenue**	**Norme de référence**
Béton	Résistance caractéristique à la compression (fc28)	25 MPa	BAEL 91 révisé 99
Béton	Module d'Young (Eb)	32 000 MPa	BAEL 91
Béton	Masse volumique (γb)	25 kN/m³	BAEL 91
Acier HA	Nuance	Fe E500	NF A 35-080
Acier HA	Limite élastique (fe)	500 MPa	NF A 35-080
Acier HA	Module d'élasticité (Es)	200 000 MPa	BAEL 91
Sol (fondations)	Contrainte admissible (σadm)	0,20 MPa (valeur indicative)	Pratique ivoirienne

I.3.5. Caractéristiques des matériaux retenus

Les matériaux retenus pour la conception et le dimensionnement structurel du bâtiment R+5 sont conformes aux pratiques courantes du secteur de la construction en Côte d'Ivoire et aux prescriptions des normes de calcul applicables. Le Tableau 3 recapitule les principales caractéristiques mécaniques retenues.

I.4. CADRE DE L'ETUDE

I.4.1. Problématique centrale de l'étude

Le secteur de la construction en Côte d'Ivoire connaît une forte dynamique, soutenue par la croissance urbaine d'Abidjan et les investissements prévus dans le cadre du Plan National de Développement (PND) 2021-2025. Cette évolution entraîne une augmentation des besoins en infrastructures et en bâtiments, tout en imposant aux bureaux d'études et aux entreprises des exigences accrues en matière de maîtrise des délais, des coûts et de la qualité des ouvrages.

Cependant, la réalisation des projets de bâtiment demeure confrontée à plusieurs difficultés, notamment les erreurs de coordination entre les intervenants, les incohérences entre les documents techniques, les modifications tardives de conception et les écarts entre les quantités prévues et celles réellement exécutées. Ces contraintes peuvent entraîner des retards d'exécution, des surcoûts et une diminution de la performance globale des projets.

Face à ces enjeux, le Building Information Modeling (BIM) apparaît comme une approche permettant de centraliser les informations du projet au sein d'une maquette numérique collaborative. L'intégration des dimensions 4D (temps) et 5D (coûts) offre des possibilités d'améliorer la planification des travaux, le suivi des ressources et la maîtrise budgétaire.

Dans ce contexte, la présente étude s'intéresse à l'application du BIM dans le cycle de vie d'un projet de bâtiment R+5 à Abidjan-Bingerville, afin d'évaluer sa contribution au dimensionnement structurel, à l'optimisation du planning d'exécution et à l'estimation des coûts du projet.

I.4.2. Question de recherche

La question centrale de cette étude est la suivante :

Dans quelle mesure l'intégration du BIM 4D/5D, associée au dimensionnement structurel selon le BAEL 91 révisé 99, permet-elle d'améliorer la maîtrise des délais, la précision des coûts et la coordination des acteurs dans la réalisation d'un bâtiment R+5 à Abidjan-Bingerville ?

Cette question se décline en trois axes d'analyse :

- L'impact du BIM 4D sur l'optimisation du planning d'exécution ;
- L'apport du BIM 5D dans l'amélioration de l'estimation des coûts ;
- L'influence d'une maquette numérique collaborative sur la coordination entre les intervenants.

I.4.3. Objectif général

L'objectif général de cette étude est de produire et d'analyser une application intégrée de la méthodologie BIM 4D/5D combinée au dimensionnement structurel règlementaire sur un immeuble R+5 à Abidjan, afin d'évaluer les apports contrats par rapport aux méthodes traditionnelles en usage dans le secteur de la construction, en termes de maitrise des délais, de précision budgétaire et de coordination entre acteurs.

I.4.4. Objectifs spécifiques

En vue d'atteindre l'objectif général, cinq objectifs spécifiques ont été définis, correspondant chacun à une étape distincte de la démarche méthodologique :

I.4.4.1. Objectif spécifique 1 Modélisation BIM 3D

Produire une maquette numérique tridimensionnelle de l'immeuble à partir des plans 2D fournis par B2E Concept, en intégrant les éléments architecturaux et structurels nécessaires aux phases de dimensionnement, de planification et d'estimation du projet.

I.4.4.2. Objectif spécifique 2

Réaliser le dimensionnement des principaux éléments porteurs du bâtiment (dalles, poutres, poteaux et fondations) selon le règlement de calcul retenu, en effectuant une descente de charges complète depuis la toiture jusqu'aux fondations et en tenant compte des caractéristiques des matériaux utilisés ainsi que des paramètres géotechniques adoptés pour le site.

I.4.4.3. Objectif Spécifique 3 Planification BIM 4D

Élaborer un planning d'exécution intégré à la maquette numérique BIM 4D en définissant la structure de découpage des tâches (WBS), le diagramme de Gantt par lots de travaux, le chemin critique et la simulation temporelle de l'avancement du chantier, afin de visualiser la séquence constructive du bâtiment et d'identifier les contraintes susceptibles d'entraîner des retards.

I.4.4.4. Objectif Spécifique 4 Estimation des couts BIM 5D

Extraire automatiquement les quantités d'ouvrages à partir de la maquette BIM, appliquer les prix unitaires issus des bordereaux de prix utilisés en Côte d'Ivoire et établir le Bordereau Quantitatif et Estimatif (BQE) du projet. Les résultats obtenus par extraction BIM seront comparés à ceux issus d'un métré manuel réalisé à partir des plans 2D.

I.4.4.5. Objectif spécifique 5 Analyse comparative BIM / méthode Traditionnel

Comparer les résultats obtenus par l'approche BIM 4D/5D avec ceux issus des méthodes traditionnelles selon trois critères principaux : les délais d'exécution, la précision budgétaire et la coordination entre les acteurs. Cette analyse permettra d'évaluer les apports de la démarche numérique dans le contexte d'un bureau d'études et de proposer des recommandations pour son développement.

I.5. Hypothèses de travail

À partir de la problématique et des objectifs de l'étude, trois hypothèses de travail ont été formulées. Ces hypothèses constituent des propositions de recherche qui guideront les analyses et permettront d'apprécier l'apport de la démarche BIM appliquée au projet étudié.

I.5.1. Hypothèse 1 Reduction des délais d'exécution

H1 : L'intégration de la planification BIM 4D dans la gestion du projet de construction de l'immeuble R+5 permet de réduire les délais d'exécution prévisionnels par rapport à une planification traditionnelle établie sur plans 2D, grâce à une meilleure anticipation des contraintes temporelles, à la visualisation des séquences constructives par niveau et par lot, et à la détection précoce des interférences entre corps d'état avant le démarrage du chantier.

I.5.2. Hypothèse 2 Amélioration de la précision budgétaire

H2 : L'extraction automatique des quantités d'ouvrages à partir de la maquette BIM 3D du bâtiment produit une estimation budgétaire plus précise que les métrés manuels réalisés sur plans 2D, en réduisant les erreurs de comptage, les omissions d'ouvrages et les imprécisions liées aux tolérances de mesure.

I.5.3. Hypothèse 3 Amélioration de la coordination entre acteurs

H3 : Le recours à une maquette numérique unique partagée entre les différents intervenants du projet : architectes, ingénieurs structure, économiste de la construction, chefs de lot améliore la coordination interdisciplinaire, réduit les conflits liés aux incohérences entre documents 2D produits séparément, et facilite la prise de décision collective tout au long du cycle de vie du projet.

Ce chapitre a permis de présenter le contexte de l'étude, le projet retenu, ainsi que la problématique, les objectifs et les hypothèses de recherche. Il constitue le cadre de référence de ce mémoire et prépare la revue de la littérature développée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II. REVUE DE LA LITTERATURE

Le secteur de la construction connaît depuis plusieurs années une transformation profonde liée à l'intégration progressive des technologies numériques dans les processus de conception, de réalisation et d'exploitation des ouvrages. Parmi ces innovations, le Building Information Modeling (BIM) apparaît aujourd'hui comme l'une des évolutions majeures des pratiques de l'Architecture, de l'Ingénierie et de la Construction (AEC).

Contrairement aux méthodes traditionnelles basées principalement sur des documents graphiques indépendants, le BIM propose une approche collaborative fondée sur la création d'une maquette numérique intelligente, regroupant les informations géométriques, techniques, temporelles et économiques relatives à un projet de construction. Cette approche permet d'améliorer la coordination entre les acteurs, de limiter les erreurs de conception, d'optimiser la planification des travaux et d'améliorer la maîtrise des coûts.

Dans le cadre de cette étude portant sur la mise en œuvre d'une démarche BIM appliquée à un bâtiment R+5 situé à Abidjan-Bingerville, la revue de littérature s'articule autour de trois axes principaux :

- Les concepts fondamentaux du Building Information Modeling, notamment les dimensions BIM 3D, 4D et 5D ;
- Les principes du dimensionnement des structures en béton armé selon les normes applicables dans le contexte ivoirien ;
- L'apport du BIM dans la planification des travaux et l'estimation des coûts.

Une attention particulière est accordée aux travaux scientifiques réalisés dans les pays en développement et en Afrique subsaharienne afin de positionner cette étude dans son contexte régional.

II.1. Le Building Information Modeling (BIM)

II.1.1. Définition et évolution historique du BIM

Le Building Information Modeling (BIM), traduit en français par Modélisation des Informations du Bâtiment, désigne une méthode de travail collaborative basée sur la création, la gestion et l'exploitation d'une représentation numérique intelligente d'un ouvrage durant son cycle de vie.

Le BIM correspond à une technologie de modélisation et un ensemble de processus associés permettant de produire, communiquer et analyser des modèles numériques de bâtiments [3]. Cette approche est également encadrée par la norme ISO 19650, qui définit le BIM comme une méthode de gestion collaborative de l'information basée sur une représentation numérique partagée d'un actif construit [10] .Cette définition met en évidence deux aspects essentiels du BIM : d'une part, la production d'un modèle numérique contenant des informations structurées ; d'autre part, l'organisation des échanges entre les différents intervenants du projet.

Le BIM ne doit donc pas être considéré uniquement comme un logiciel de modélisation tridimensionnelle. Il constitue avant tout une méthode d'organisation de l'information, intégrant des processus collaboratifs permettant aux architectes, ingénieurs, entreprises et maîtres d'ouvrage de travailler autour d'une source de données commune.

La maquette numérique BIM représente une évolution importante par rapport aux méthodes classiques de conception assistée par ordinateur (CAO). Alors que les plans 2D traditionnels représentent uniquement l'apparence graphique d'un ouvrage, la maquette BIM associe à chaque élément du bâtiment des informations géométriques et techniques : dimensions, matériaux, caractéristiques physiques, propriétés mécaniques ou données économiques.

Le BIM constitue un ensemble de technologies, de processus et de politiques permettant la gestion numérique des informations relatives à un bâtiment durant son cycle de vie[11].

II.1.2. Principes fondamentaux du BIM

La démarche BIM repose sur plusieurs principes fondamentaux :

II.1.2.1. La maquette numérique BIM

La maquette numérique constitue l'élément central de la démarche BIM. Elle correspond à une représentation virtuelle tridimensionnelle du bâtiment composé d'objets paramétriques.

Chaque objet possède :

- Une représentation géométrique en trois dimensions ;
- Des caractéristiques physiques et techniques ;
- Des relations avec les autres éléments du modèle ;
- Des informations exploitables pour différentes analyses.

Par exemple, un poteau modélisé dans une maquette BIM ne représente pas seulement une forme géométrique. Il contient également des informations relatives à sa section, son matériau, son niveau d'implantation ou encore ses propriétés nécessaires au calcul structurel.

Cette richesse informationnelle permet d'utiliser une même maquette pour plusieurs applications : visualisation, coordination technique, calcul structurel, estimation quantitative, planification ou maintenance.

L'un des principaux avantages du BIM réside dans sa capacité à améliorer la communication entre les acteurs du projet grâce au partage d'un modèle numérique commun [12].

II.1.3. Les dimensions du BIM

L'une des principales caractéristiques du Building Information Modeling (BIM) réside dans sa capacité à intégrer progressivement différentes catégories d'informations autour d'une même maquette numérique. Ces extensions sont communément appelées dimensions du BIM. Elles correspondent aux différents usages possibles du modèle numérique selon la nature des informations intégrées : géométriques, temporelles, économiques, environnementales ou liées à l'exploitation du bâtiment.

Il convient toutefois de préciser que les dimensions du BIM ne représentent pas des niveaux de maturité ou des étapes successives obligatoires dans la mise en œuvre d'une démarche BIM. Elles correspondent plutôt à des axes d'enrichissement du modèle numérique permettant de répondre à différents objectifs du projet [13].

Dans le cadre de cette étude, l'analyse porte principalement sur les dimensions BIM 3D, BIM 4D et BIM 5D, correspondant respectivement à la modélisation numérique, à l'intégration du planning et à l'estimation économique du projet.

II.1.3.1. Représentation géométrique et coordination spatiale

Le **BIM 3D constitue le socle fondamental de toute démarche BIM**. Il correspond à la création d'une représentation numérique tridimensionnelle d'un ouvrage intégrant les différents composants architecturaux, structuraux et techniques du bâtiment. Contrairement à une modélisation géométrique classique, la maquette BIM 3D repose sur des **objets paramétriques intelligents**, auxquels sont associées des informations géométriques, physiques et techniques nécessaires aux différentes phases du projet [14]

Ainsi, un élément structurel tel qu'une poutre, un poteau ou une dalle n'est pas uniquement représenté par sa forme géométrique, mais contient également des informations relatives à ses dimensions, son matériau, son niveau d'implantation ou encore ses caractéristiques techniques. Cette organisation permet d'obtenir une base de données numérique exploitable par les différents intervenants du projet tout au long du cycle de vie du bâtiment [13].

Dans un projet de construction, le BIM 3D permet notamment :

- La visualisation réaliste du projet avant sa réalisation ;
- La génération automatique des plans, coupes et élévations à partir de la maquette numérique ;
- L'extraction automatique de certaines quantités nécessaires aux études techniques et économiques ;
- La vérification de la cohérence géométrique entre les différents éléments du modèle.

Parmi les applications majeures du BIM 3D figure la **détection des conflits**, également appelée **clash detection**. Cette fonctionnalité consiste à analyser automatiquement la maquette numérique afin d'identifier les interférences géométriques entre les éléments provenant de différentes disciplines : architecture, structure, plomberie, électricité ou ventilation [14].

Les conflits détectés peuvent correspondre, par exemple, à :

- une poutre structurelle traversant une gaine technique ;
- un réseau passant à travers un élément porteur ;
- une incompatibilité entre un choix architectural et une disposition structurelle.

L'identification précoce de ces incohérences permet aux concepteurs de proposer des solutions avant le démarrage du chantier. Elle contribue ainsi à limiter les modifications en phase d'exécution, souvent responsables d'une augmentation des coûts et des délais du projet [13].

Il est toutefois important de préciser que la **clash detection appartient principalement au BIM 3D**, car elle repose sur l'analyse géométrique et spatiale des éléments de la maquette numérique. Cependant, les résultats de cette analyse peuvent influencer la planification en **BIM 4D** lorsque les corrections apportées entraînent une modification du séquencement ou de l'organisation temporelle des travaux [13], [14].

Dans le cadre de cette étude, le BIM 3D constitue la première étape de la démarche proposée. La maquette numérique du bâtiment R+5 étudié permet d'assurer la représentation des éléments architecturaux et structurels, de préparer l'intégration avec les outils de planification 4D et de faciliter l'extraction des données nécessaires à l'estimation des coûts en BIM 5D.

II.1.3.2. BIM 4D Dimension temporelle

Le BIM 4D correspond à l'association entre la maquette numérique 3D et le planning d'exécution des travaux.

Cette approche consiste à relier chaque élément du modèle à une tâche du calendrier de construction afin de simuler l'évolution du chantier dans le temps.

Le BIM 4D permet notamment :

- de visualiser la succession des phases de construction ;
- d'analyser le phasage des travaux ;
- d'identifier les contraintes d'organisation ;
- d'améliorer la communication entre les intervenants.

les simulations 4D facilitent la compréhension du processus constructif et permettent une meilleure coordination entre les acteurs [15].

Dans le cadre de cette étude, le BIM 4D sera utilisé pour analyser l'organisation temporelle des travaux du bâtiment R+5 de Bingerville.

II.1.3.3. BIM 5D Dimension économique

Le BIM 5D ajoute la dimension économique à la maquette numérique en associant les objets du modèle aux quantités et aux coûts correspondants.

Cette approche permet d'obtenir automatiquement des informations quantitatives telles que :

- volumes de béton ;
- surfaces de coffrage ;
- quantités d'acier ;
- surfaces de plancher ;
- longueurs d'éléments structurels.

Ces données peuvent ensuite être associées aux prix unitaires afin d'établir une estimation financière du projet.

le BIM 5D améliore la fiabilité des estimations grâce à la mise à jour automatique des coûts lorsque la conception évolue [16].

Dans cette étude, le BIM 5D sera utilisé pour produire une estimation quantitative et financière du bâtiment R+5.

II.1.4. Autres dimensions du BIM

Au-delà du BIM 5D, la littérature présente également d'autres extensions :

- **BIM 6D :** intégration des données liées à la performance énergétique et au développement durable ;
- **BIM 7D :** gestion de l'exploitation et de la maintenance de l'ouvrage.

Cependant, ces dimensions ne seront pas développées dans cette étude puisque le périmètre du mémoire concerne principalement la modélisation 3D, la planification 4D et l'estimation 5D.

II.2. Adoption du BIM dans le monde et en Afrique subsaharienne

L'adoption du **Building Information Modeling (BIM)** constitue aujourd'hui une évolution majeure dans le secteur de l'Architecture, de l'Ingénierie et de la Construction (AEC). Initialement développé comme une approche numérique permettant d'améliorer la représentation des bâtiments, le BIM est progressivement devenu une méthode de gestion collaborative de l'information durant l'ensemble du cycle de vie des ouvrages.

Les premiers travaux théoriques associés au BIM remontent aux recherches de **Charles Eastman**, qui introduisit dans les années 1970 le concept de *Building Description System (BDS)* [17]. Cette approche proposait déjà l'idée d'une représentation numérique du bâtiment capable de stocker des informations relatives aux composants de l'ouvrage et de générer automatiquement des documents graphiques ainsi que des analyses quantitatives.

Certains pays ont rapidement adopté des politiques nationales favorisant l'utilisation du BIM. Le Royaume-Uni constitue l'un des exemples les plus avancés avec la mise en place de sa stratégie BIM nationale en 2011. Cette politique a conduit à rendre obligatoire l'utilisation du BIM niveau 2 pour les projets publics à partir de 2016, dans l'objectif d'améliorer la maîtrise des coûts, des délais et de la qualité des projets [18].

En France, la transition numérique du secteur de la construction a été encouragée par la création du **Plan de Transition Numérique dans le Bâtiment (PTNB)** en 2015, visant à accompagner progressivement les entreprises dans l'intégration des méthodes BIM[19].

À l'échelle mondiale, plusieurs études montrent que les principaux bénéfices attendus du BIM concernent :

- L'amélioration de la coordination entre les acteurs ;
- La réduction des erreurs de conception ;
- L'amélioration de la maîtrise des délais ;
- L'optimisation des coûts grâce à l'exploitation des données quantitatives issues des modèles numériques.

les utilisateurs expérimentés du BIM déclarent observer une amélioration importante de la collaboration, de la productivité et de la performance globale des projets [20].

II.3. Facteurs influençant l'adoption du BIM

Malgré ses avantages démontrés, l'adoption du BIM reste dépendante de plusieurs facteurs techniques, économiques et organisationnels.

la mise en œuvre du BIM repose sur l'évolution simultanée de trois composantes principales [21]:

- les technologies utilisées ;
- les processus de travail ;
- les compétences des acteurs.

Ainsi, l'utilisation d'un logiciel BIM ne constitue pas à elle seule une démarche BIM complète. Celle-ci implique une transformation des méthodes de conception, de coordination et de gestion de l'information.

Les principales barrières identifiées dans la littérature concernent :

a) Les contraintes économiques

L'investissement initial constitue un frein important pour certaines entreprises. Il concerne notamment :

- l'acquisition des licences logicielles ;
- l'achat de matériels informatiques adaptés ;
- la formation du personnel.

Le coût d'investissement représente l'une des principales difficultés rencontrées par les entreprises des pays en développement [4].

b) Le manque de compétences BIM

Le BIM nécessite de nouvelles compétences liées à la modélisation numérique, à la gestion des données et à la coordination entre disciplines.

Le manque de formation constitue donc un obstacle majeur, particulièrement dans les pays où les programmes universitaires intègrent encore peu les méthodes BIM [21].

c) L'absence de normes et de cadres réglementaires

L'efficacité d'une démarche BIM dépend également de l'existence de standards permettant de définir :

- les responsabilités des acteurs ;
- les formats d'échange ;
- les niveaux d'information attendus ;
- les procédures de validation.

Dans cette logique, la série de normes **ISO 19650** [10] fournit aujourd'hui un cadre international pour la gestion de l'information BIM.

II.4. Situation du BIM en Afrique subsaharienne

En Afrique subsaharienne, l'adoption du BIM demeure encore émergente. Contrairement aux pays européens ou asiatiques ayant développé des stratégies nationales, la majorité des pays africains ne dispose pas encore de réglementation imposant l'utilisation du BIM dans les projets publics ou privés.

Cependant, plusieurs pays montrent une dynamique croissante, notamment l'Afrique du Sud, qui constitue l'un des marchés BIM les plus avancés du continent.

Les recherches de **Miettinen et Paavola** montrent cependant que l'adoption du BIM dans les pays émergents dépend fortement du niveau de maturité numérique des organisations et de leur capacité à transformer leurs pratiques internes [21]

Les principales difficultés rencontrées en Afrique subsaharienne sont :

- le coût élevé des solutions BIM ;
- le manque de professionnels formés ;
- l'absence de standards nationaux ;
- la faible demande des maîtres d'ouvrage ;
- la persistance des méthodes traditionnelles basées sur les plans 2D.

les obstacles à l'adoption du BIM dans les pays africains peuvent être regroupés en trois catégories [22]:

- obstacles technologiques ;
- obstacles organisationnels ;
- obstacles institutionnels.

II.5. Contexte ivoirien et justification de l'étude

En Côte d'Ivoire, le secteur du bâtiment connaît depuis plusieurs années une croissance importante liée au développement urbain, particulièrement dans la région d'Abidjan. Cette évolution entraîne une augmentation de la complexité des projets et nécessite progressivement l'intégration de nouvelles méthodes de gestion.

Cependant, l'utilisation du BIM reste encore limitée dans la majorité des bureaux d'études et entreprises de construction ivoiriens. Les pratiques courantes reposent principalement sur :

- la production de plans 2D ;
- les métrés manuels ;
- les échanges classiques de documents.

Quelques acteurs commencent néanmoins à intégrer progressivement des outils BIM dans leurs processus de travail.

Dans ce contexte, le présent mémoire s'inscrit dans une démarche d'expérimentation visant à démontrer l'intérêt du BIM appliqué à un projet réel de bâtiment en Côte d'Ivoire.

L'étude du bâtiment R+5 situé à Abidjan-Bingerville permet ainsi d'explorer l'utilisation combinée :

- d'une maquette numérique 3D ;
- d'une approche BIM 4D pour la planification ;
- d'une approche BIM 5D pour l'estimation des coûts ;
- d'une intégration avec le dimensionnement structurel en béton armé.

II.6. Intégration BIM-Calcul Structurel : interopérabilité

L'intégration entre les outils BIM de modélisation et les logiciels de calcul structurel constitue un enjeu majeur de la démarche BIM en ingénierie du bâtiment : Elle vise à éviter la ressaisie manuelle des données géométriques entre les deux environnements logiciels, source d'erreurs et de perte de temps dans les bureaux d'études qui, B2E Concept, disposent de ressources humaines limitées.

L'échange de données entre logiciels BIM et moteurs de calcul structurel peut s'opérer via le format IFC ou via des passerelles directes spécifiques à certains couples de logiciels. Toutefois, plusieurs travaux ont montré que l'interopérabilité BIM reste encore confrontée à certaines limites pratiques, notamment les pertes ou modifications partielles d'informations lors des échanges IFC, la nécessité de corrections manuelles après l'importation du modèle structurel et les difficultés de synchronisation lorsque le modèle architectural évolue au cours du projet [23].Ces contraintes peuvent être accentuées dans les structures disposant de versions logicielles standards ou de ressources limitées, ce qui nécessite une approche adaptée aux moyens disponibles. Dans le cadre de cette étude, une démarche pragmatique d'échange entre Revit et Robot Structural Analysis a donc été adoptée, comme présenté dans le chapitre suivant.

II.7. Planification et Estimation de coûts par le BIM

II.7.1. BIM 4D : simulation temporelle et optimisation du planning

La planification BIM 4D repose sur la liaison entre les objets de la maquette et les tâches d'un planning d'exécution, réalisée dans les logiciels spécialisés qui permettent d'importer à la fois

la maquette BIM et le planning (au format Microsoft Project ou Primavera P6) et d'établir les correspondances entre les deux.

Le processus de planification 4D comporte plusieurs étapes structurantes développées au chapitre suivant dans le bâtiment R+5 de Bingerville. La structure de décomposition des travaux (WBS) permet de hiérarchiser l'ensemble des tâches, leurs relations de précédence et les ressources associées. L'identification du chemin critique (séquence de tâches dont tout retard retentit directement sur la date de fin du projet) est déterminante pour concentrer les efforts de maîtrise des délais sur les tâches les plus sensibles, en réponse à la problématique de dépassement des délais identifiée au chapitre premier.

La valeur ajoutée spécifique du BIM 4D réside dans la simulation dynamique de l'avancement : la visualisation tridimensionnelle du chantier à chaque instant du planning permet de détecter visuellement des conflits d'occupation entre corps d'état, d'anticiper ls besoins en zones de stockage et d'accès aux engins, et de valider la cohérence de la séquence constructive avant tout démarrage des travaux.

II.7.2. BIM 5D : extraction des quantités et maîtrise budgétaire

L'estimation des coûts par le BIM 5D s'appuie sur la capacité de la maquette numérique à générer automatiquement des nomenclatures quantitatives précises : volumes de béton, surfaces de coffrage, longueurs et sections d'armatures, surfaces de plancher, linéaire de poutres et poteaux. Ces quantités sont exportées et confrontées à des bibliothèques de prix unitaires pour produire le Bordereau Quantitatif et Estimatif (BQE).

La fiabilité de l'estimation 5D est directement conditionnée par la qualité et le niveau de développement de la maquette BIM. Le LOD 300 retenu pour le Bâtiment R+5 correspond au seuil à partir duquel les quantités extraites peuvent être utilisées pour une estimation détaillée fiable. Dans le contexte ivoirien, l'élaboration du BQE s'appuie sur les Bordereaux de Prix Unitaires (BPU) en usage dans la profession, qui reflètent les conditions locales du marché de la construction d'Abidjan : couts de main d'œuvre, prix des matériaux sur le marché local et couts de la location des équipements.

Ce chapitre a permis de présenter les concepts fondamentaux du BIM, ses dimensions 3D, 4D et 5D, ainsi que son intérêt dans l'amélioration de la conception, de la planification et de l'estimation des projets de construction. Il a également permis de situer les enjeux liés à l'adoption du BIM en Côte d'Ivoire et de définir le cadre de dimensionnement structurel en

béton armé applicable au bâtiment étudié. Cette synthèse constitue la base de la démarche méthodologique développée dans la suite de cette étude.

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Ce présent chapitre présente l'ensemble des outils et des protocoles méthodologues mobilisés pour atteindre les cinq objectifs spécifiques définis. Il décrit successivement les outils retenus pour la modélisation BIM 3D, le dimensionnement structurel, la planification 4D et l'estimation 5D, puis expose pour chacune de ces étapes la démarche méthodologique adoptée dans le cadre du projet de bâtiment R+5 localisé à Abidjan-Bingerville. Enfin, le protocole d'analyse comparative BIM versus méthodes traditionnelles est défini, afin e disposer d'un cadre rigoureux pour la vérification des hypothèses H1, H2 et H3.

III.1 Outils et logiciels utilisés

III.1.1. Logiciel BIM de modélisation

La modélisation tridimensionnelle du bâtiment R+5 a été réalisée sous **Autodesk Revit 2025**, logiciel de modélisation BIM développé par Autodesk et couramment utilisé pour la conception architecturale, structurelle et technique des ouvrages. Revit permet la création d'une maquette unique intégrant simultanément les éléments architecturaux et structurels, avec une gestion native des familles paramétriques, des nomenclatures automatiques et de l'export aux formats IFC, RVT ET NWC. Revit occupe une place centrale dans la chaîne d'outils utilisée pour cette étude : il sert de support à la modélisation BIM 3D, il permet de vérifier nativement les interférences, il fournit les nomenclatures nécessaires pour le BIM 5D, et il constitue la plateforme de liaison 4D pour la planification. La connexion directe Revit-Robot Structural Analysis permet le transfert bidirectionnel du modèle structurel, et l'export vers Autodesk Navisworks Manage permet l'intégration dans la démarche BIM 4D et 5D.

III.1.2. Logiciel de Calcul Structurel

Le dimensionnement structurel des éléments porteurs a été conduit à l'aide du logiciel Robot Structural Analysis Professional (Autodesk), couplé à des vérifications manuelles selon le BAEL 91 pour les éléments principaux. Robot Structural Analysis permet l'import du modèle structurel depuis Revit via la passerelle directe Revit-Robot, la définition des charges et des combinaisons d'actions conformément au BAEL 91, et le dimensionnement automatique des sections d'armatures. Les résultats obtenus ont été systématiquement vérifiés par des notes de calcul manuelles pour les éléments critiques.

III.1.3. Logiciel de planification 4D

La planification du projet a été réalisée sous Microsoft Project, permettant l'élaboration du planning Gantt, la définition des relations de précédence entre tâches, le calcul du chemin critique et la gestion des ressources.

La simulation BIM 4D a été mise en œuvre à l'aide de Autodesk Navisworks Manage. Le modèle BIM issu de Revit a été exporté au format NWC puis importé dans Navisworks ou le planning élaboré sous Microsoft Project a été intégré. Les taches du planning ont été associées aux éléments de la maquette, permettant de simuler l'évolution du chantier dans le temps.

Cette approche permet une visualisation dynamique de l'avancement des travaux, facilitant l'identification des conflits d'ordonnancement, l'optimisation du phasage et l'amélioration de la coordination entre les différents corps d'états.

III.1.4. Logiciel d'estimation 5D

L'extraction des quantités et l'estimation budgétaire 5D ont été réalisées en combinant les nomenclatures automatiques générées depuis Revit, leur exploitation dans Navisworks Manage, et le traitement sous Microsoft Excel. Les prix unitaires issus des bordereaux de prix en vigueur en Côte d'Ivoire ont été appliqués sous Excel pour l'établissement du Bordereau Quantitatif et Estimatif (BQE).

Tableau 4 : Logiciel pour l'estimation

Étape	Outil principal	Rôle dans la démarche
Modélisation BIM 3D	Autodesk Revit 2025	Maquette unique, familles paramétriques, nomenclatures
Calcul structurel	Robot Structural Analysis Pro	Descente de charges, dimensionnement, vérifications
Planification 4D	MS Project + Navisworks Manage	Planning Gantt, WBS, simulation temporelle
Estimation 5D	Revit + Navisworks + Excel	Extraction quantités, BQE, analyse comparative

III.2. Démarche de modélisation BIM 3D

III.2.1. Protocole de modélisation sous Revit

La modélisation du bâtiment R+5 a suivi un protocole rigoureux décomposé en cinq étapes séquentielles. Première étape : paramétrage du projet (unités métriques, grille structurelle, niveaux de plancher de RDC à toiture). Deuxième étape : modélisation des éléments structurels porteurs (semelles, longrines, poteaux, poutres, dalles) à partir des plans architecturaux fournis par B2E Concept. Troisième étape : modélisation des éléments architecturaux non porteurs (murs de remplissage, cloisons, escaliers, menuiseries). Quatrième étape : attribution des propriétés matériaux aux éléments modélisés. Cinquième étape : génération des nomenclatures quantitatives et vérification de la cohérence du modèle.

III.2.2. Détection des conflits

La détection des conflits entre disciplines a été conduite dans Navisworks Manage à partir du modèle exporté au format NWC. Les tests de clash ont été réalisés entre les disciplines de structure et d'architecture. Les conflits identifiés ont été classifiés et les corrections ont été apportées au modèle Revit avant de poursuivre les étapes de dimensionnement.

III.3. Démarche de dimensionnement structurel

III.3.1. Descente de charges

La descente de charges constitue la première étape du dimensionnement structurel du bâtiment. Elle consiste à déterminer, pour chaque élément porteur, l'ensemble des sollicitations transmises depuis les niveaux supérieurs jusqu'aux fondations. Cette opération permet d'évaluer les efforts appliqués aux dalles, poutres, poteaux et semelles afin de procéder à leur dimensionnement conformément aux prescriptions du BAEL 91 révisé 99.

Dans le cadre de cette étude, la descente de charges a été réalisée de manière progressive, en suivant le cheminement réel des charges dans la structure du bâtiment R+5. Les charges ont été déterminées à partir des plans architecturaux et des caractéristiques géométriques des éléments porteurs.

La démarche adoptée comprend les étapes suivantes :

- Calcul des charges permanentes (G) : elles comprennent le poids propre des éléments en béton armé, calculé avec une masse volumique de 25 kN/m³, auquel s'ajoutent les

charges des revêtements de sol, des cloisons, des enduits, des ouvrages non porteurs ainsi que des équipements fixes.

- Détermination des charges d'exploitation (Q) : les charges variables ont été définies en fonction de la destination des locaux, conformément aux prescriptions réglementaires. Les valeurs retenues sont de 1,5 kN/m² pour les parties communes et 2,5 kN/m² pour les logements.
- Transmission des charges : les charges des planchers ont été réparties sur les poutres porteuses, puis transmises aux poteaux de chaque niveau avant d'être reportées sur les fondations. Cette démarche a permis de déterminer les efforts normaux repris par chaque élément vertical de la structure.
- Combinaison des actions : les sollicitations de calcul ont été obtenues à l'État Limite Ultime (ELU) en appliquant la combinaison fondamentale du BAEL 91 révisé 99 :

$$1{,}35\ G + 1{,}50\ Q$$

et à l'État Limite de Service (ELS) :

$$G + Q$$

Les efforts obtenus à l'issue de cette descente de charges ont servi de base au dimensionnement des dalles, poutres, poteaux et fondations du bâtiment étudié.

III.3.2. Dimensionnement des éléments porteurs

III.3.2.1. Dalles

Le prédimensionnement des dalles pleines a été effectué selon les règles de l'art ($l/20 \leq h \leq l/15$ pour une dalle portant dans deux directions). Le dimensionnement définitif a été réalisé dans Robot Structural Analysis par la méthode des éléments finis, avec vérification manuelle des sections critiques selon le BAEL 91.

III.3.2.2. Poutres

Le prédimensionnement des poutres a été effectué avec la règle $l/10 \leq h \leq l/8$, où l est la portée entre appuis. Le dimensionnement à la flexion simple à l'ELU et la vérification à l'ELS (flèche, fissuration) ont été conduits conformément au BAEL 91.

III.3.2.3. Poteaux

Le dimensionnement des poteaux a été conduit en compression avec flexion composée, en tenant compte des charges axiales issues de la descente de charges et des moments transmis par les poutres. La longueur de flambement a été déterminée en fonction des conditions d'appui réelles.

III.3.2.4. Fondations

Le dimensionnement des semelles isolées et des longrines a été effectué à partir des charges transmises par les poteaux et des contraintes admissibles du sol (σadm = 0,20 MPa). La vérification au poinçonnement et au glissement a été conduite conformément au DTU dans le logiciel ROBOT.

III.4. Démarche de planification BIM 4D

III.4.1. Décomposition des tâches (WBS)

La décomposition hiérarchique des travaux (WBS) du bâtiment R+5 a été structurée en sept lots principaux :

1. Installations et préparation du chantier ;
2. Fondations et infrastructure ;
3. Structure porteuse du rez-de-chaussée au niveau R+5 ;
4. Accessibilité et protection (escaliers, étanchéité et maçonnerie) ;
5. Second œuvre et lots techniques ;
6. Finitions extérieures et raccordements aux réseaux ;
7. Réception des travaux et levée des réserves.

III.4.2. Planning Gantt et chemin critique

Le planning Gantt a été élaboré sous Microsoft Project en définissant les durées de chaque tâche, les relations de précédence (liens FD, DD) et les ressources associées. La durée totale prévisionnelle du projet a été calculée par le moteur MS Project en tenant compte des contraintes de calendrier (jours ouvrables, jours fériés ivoiriens) et des ressources disponibles.

III.4.3. Simulation 4D sous Navisworks

La simulation BIM 4D a été réalisée dans Navisworks Manage par association des tâches MS Project aux éléments de la maquette Revit. Des captures de simulation ont été réalisées aux

étapes clés de la séquence constructive : fin des fondations, fin du RDC, fin de chaque étage et fermeture de la toiture.

III.5. Démarche d'estimation BIM 5D

III.5.1. Extraction des quantités depuis Revit

Les nomenclatures quantitatives ont été extraites directement depuis Revit pour les catégories d'ouvrages suivantes : béton structurel (volumes par élément), coffrage (surfaces de coffrage), armatures (à partir des familles de rebar ou estimation paramétrique), maçonnerie (surfaces et volumes), et menuiseries (liste et dimensions).

III.5.2. Élaboration du BQE sous Excel

Le Bordereau Quantitatif et Estimatif a été structuré par lots de travaux, conformément à la pratique ivoirienne. Les prix unitaires ont été issus des bordereaux de prix en vigueur sur le marché de la construction d'Abidjan. Le BQE distingue le coût des matériaux, le coût de la main-d'œuvre et le coût du matériel pour chaque poste de travaux.

III.6. Protocole de l'analyse comparative BIM / méthodes traditionnelles

L'analyse comparative a été conduite selon une méthodologie structurée en trois volets, correspondant aux trois hypothèses de travail. Pour vérifier H1 (délais), on compare la durée du planning BIM 4D à une estimation de durée par méthode traditionnelle (à partir des rendements unitaires de main-d'œuvre courants). Pour H2 (précision budgétaire), on compare les quantités extraites par BIM avec celles d'un métré manuel effectué sur les plans 2D du projet. Pour H3 (coordination), on réalise une analyse qualitative des conflits détectés lors de la phase de modélisation, en évaluant le coût de correction en conception par rapport à celui en exécution.

Ce chapitre a présenté les outils et protocoles mobilisés pour l'application BIM 4D/5D au bâtiment R+5. La chaîne Revit-Robot-MS Project-Navisworks-Excel structure l'ensemble de la démarche, depuis la modélisation 3D jusqu'à l'estimation 5D, avec des protocoles définis à chaque étape pour permettre une comparaison avec les méthodes traditionnelles. Le chapitre suivant présente les résultats obtenus.

CHAPITRE IV. PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Dans ce chapitre sont présentés les résultats obtenus après application de la démarche BIM 4D/5D sur l'ouvrage R+5. Il se compose de cinq parties correspondant aux cinq objectifs spécifiques définis au Chapitre II. Pour chaque objectif, les résultats quantitatifs et qualitatifs sont présentés et analysés. Dans la dernière partie, on expose les résultats de l'analyse comparative BIM face aux méthodes traditionnelles, qui permettent de vérifier les hypothèses H1, H2 et H3.

IV.1. Résultats de la modélisation BIM 3D

IV.1.1. Maquette numérique Architecturale du bâtiment R+5

La maquette BIM 3D du bâtiment R+5 a été produite sous Autodesk Revit 2025 à un niveau de développement LOD 300. Elle intègre l'ensemble des éléments architecturaux et structurels du bâtiment, depuis les fondations jusqu'à la toiture, conformément aux plans fournis par B2E Concept.

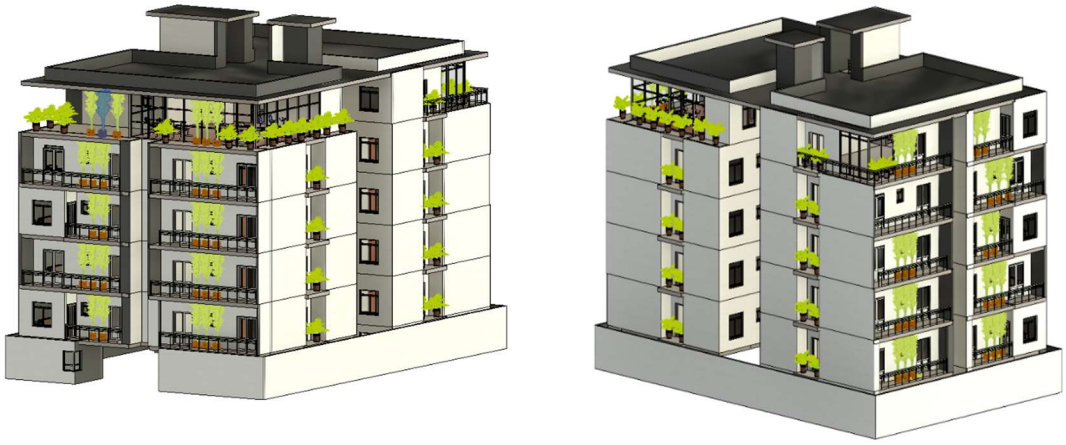


Figure 3 : Vues Maquette 3D

IV.1.2. Maquette numérique structurelle du bâtiment R+5

La maquette structurelle du bâtiment R+5 a été modélisée sous Autodesk Revit 2025 au niveau LOD 300 afin de représenter l'ensemble du système porteur de l'ouvrage. Elle comprend les éléments en béton armé tels que les semelles, longrines, poteaux, poutres, dalles ainsi que les voiles éventuels.

Ce modèle met en évidence l'organisation structurelle du bâtiment et assure la cohérence géométrique entre les différents éléments résistants. Il constitue également une base exploitable pour l'extraction des quantités et l'intégration ultérieure dans le processus de planification BIM 4D.

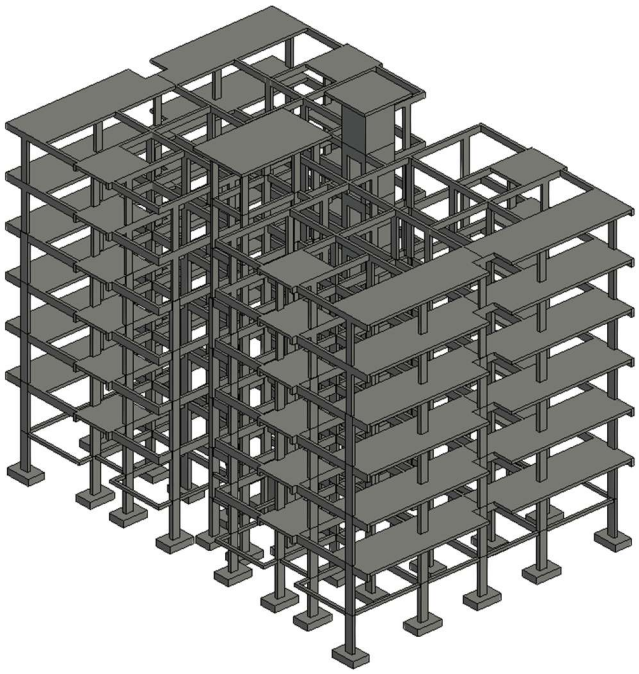


Figure 4 : Vue 3D Maquette Structurale

IV.2. Résultats du dimensionnement structurel

IV.2.1. Descente de charges

La descente de charges complète depuis la toiture jusqu'aux fondations a été effectuée pour l'ensemble des portiques du bâtiment. Les résultats sont présentés pour les poteaux les plus chargés (poteaux centraux à toutes les trames).

Tableau 5 : Prédimensionnement de poutres

Poutre Hyperstatique			
Lmax =	5	(m)	
Lmax/15 =	0,33	(m)	
Lmax/10 =	0,5	(m)	
h =	42	(cm)	
CHOIX =	40	(cm)	
b =	22	(cm)	
CHOIX "b" =	25	(cm)	
SECTION =		25 x 40	

Tableau 6: Prédimensionnement de Poteaux

Hauteur d'étage		L0=	3,2	m
Longueur de flambement	Lf = 0,7 L0	Lf=	2,24	m
Contrainte du béton a 28 jours		Fcj=	25	MPa
Effort ultime = 1,35G + 1,5Q		Nu=	1,325	MN
Coefficient de sécurité dans le béton.	g b	ɣb=	1,5	sans unité
Elancement	Y=(2*1,73 Lf / a)	Y=	35	sans unité
Résultats				
COFFICIENT DE FLAMBAGE	Y < 50 ==> α=0,85/(1+0,2(y/35)^2	α=	0,708	sans unité
	Y > 50 ==> α=0,6*(50/Y)^2	α=	1,224	sans unité
CORRECTION DE COFFICIENT DE FLAMBAGE		α=	0,708	sans unité
aire de section - 2cm	Br = 0,9 * yb * Nu / α * fc28	Br=	0,10	m²
cotés "a" du poteau - section carré	a = Racine(Br) + 2	a=	33,79	cm
cotés "a" er "b" du poteau - section rectangulaire	a = Lf * Racine(12) / y	a=	22,17	cm
	b = (Br / (a - 2)) + 2	b=	52,09	cm
diamètre "d" du poteau - section circulaire	d = Racine(4*Br/ π) + 2	d=	37,88	cm
	SECTION =	55	X	25

Tableau 7 : Descente de charges sur Poteau

NOTE DE CALCUL : G et Q

	Long	Larg	
Surface d'influence	**4,58**	**3,68**	**16,8544**

TERRASSE NON ACCESSIBLE

Elements	Epaisseur (m)	Poids volumique (kN/m³)	kN/m²	Surface d'influence	kN
Protection gravillon roulé	0,05	18	0,9	16,8544	15,16896
Étanchéité multicouche	0,03	6	0,18		3,033792
Forme de pente béton maigre	0,08	20	1,6		26,96704
Faux plafond BA 13			0,15		2,52816
Dalle en corps creux inclus. Table de compression (16+4)			2,85		48,03504
poids propre de poutre					16,52
G			5,68	16,8544	
					112,252992

Types	Charge (kN/m²)	Surface d'influence	kN
Terrasse non accessible			
batiment	1,5	16,8544	25,2816

Nu:(1,35*G)+(1,5*Q)	189,46	kN
1,35G	151,54	kN

PENTHOUSE

Element	Epaisseur (m)	Poids volumique (kN/m³)	kN/m²	Surface d'influence	kN/m
Carrelage scellé + Mortier de pose 2cm	0,02	20	0,4	16,8544	6,74176
Chape de mortier de ciment	0,07	20	1,4		23,59616
Faux plafond BA 13			0,15		2,52816
Dalle en corps creux inclus. Table de compression (16+4)			2,85		48,03504
poids propre de poutre					24,78
G			**6,06**		
					105,68112

Types	Charge (kN/m²)	Surface d'influence	kN/m
Logement résidentiel	2,5	16,8544	42,136

Nu:(1,35*G)+(1,5*Q)	205,87	kN
1,35G	142,67	kN

ETAGE COURANT (R+1 à R+4)

Element	Epaisseur (m)	Poids volumique (kN/m³)	kN/m²	Surface d'influence	kN/m

Carrelage scellé + Mortier de pose 2cm	0,02	20	0,4		6,74176
Chape de mortier de ciment	0,07	20	1,4		23,59616
Faux plafond BA 13			0,15	16,8544	2,52816
Dalle en corps creux inclus. Table de compression (16+4)			2,85		48,03504
poids propre de poutre					24,78
G			**6,06**		
					105,68112
Types	**Charge (kN/m²)**	**Surface d'influence**	**kN/m**		
Logement résidentiel	2,5	16,8544	42,136		

Nu:(1,35*G)+(1,5*Q)	205,87	kN
1,35G	142,67	kN
Nu:(1,35*G)+(1,5*Q)	823,494048	kN
1,35G	570,678048	kN

MUR EN AGGLO DE 15					
Element	**Epaisseur (m)**	**Poids volumique (kN/m³)**	**kN/m²**	**Surface**	**kN**
Agglo creux 15 cm	0,15	12	1,8		20,9664
Enduit hydraulique face ext.	0,015	22	0,33	11,648	3,84384
Enduit hydraulique face int.	0,015	22	0,33		3,84384
G			**2,68 kN/m²**		
G					28,65408
Nu:(1,35*G)+(1,5*Q)	15,72	kN			
1,35G	15,72	kN			
	94,3488				
Nu	1313,18	kN			

IV.2.2. Dimensionnement des dalles

Les dalles ont été dimensionnées selon les règles de prédimensionnement puis vérifiées sous Robot Structural Analysis. Les résultats confirment que les épaisseurs retenues respectent les critères de résistance et de service.

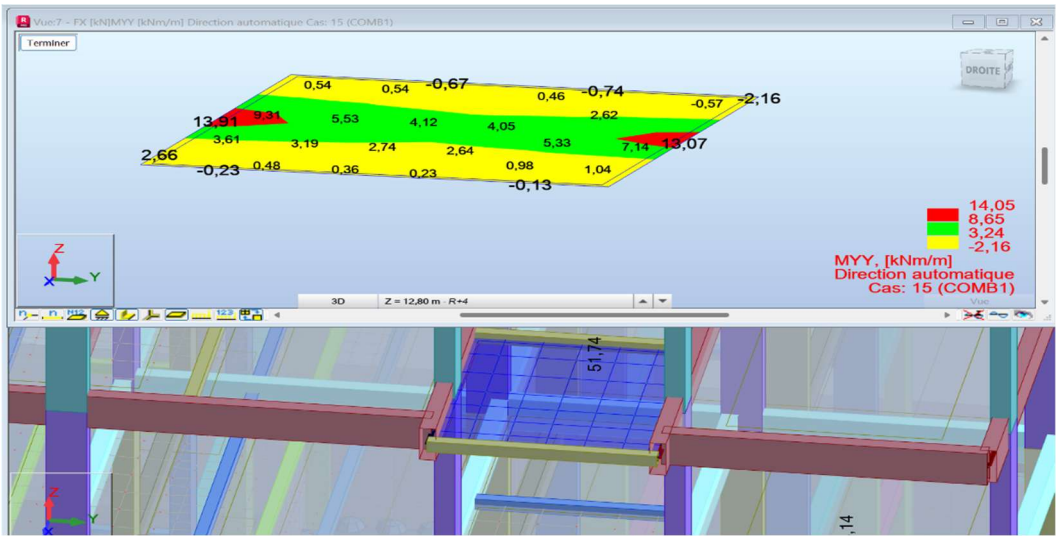


Figure 5 : Cartographie de dalle

IV.2.3. Dimensionnement des poutres

Les poutres ont été dimensionnées en tenant compte des portées et des charges appliquées. Les vérifications réalisées sous Robot confirment la conformité des sections adoptées. Les armatures retenues assurent efficacement la reprise des efforts de flexion et de cisaillement.

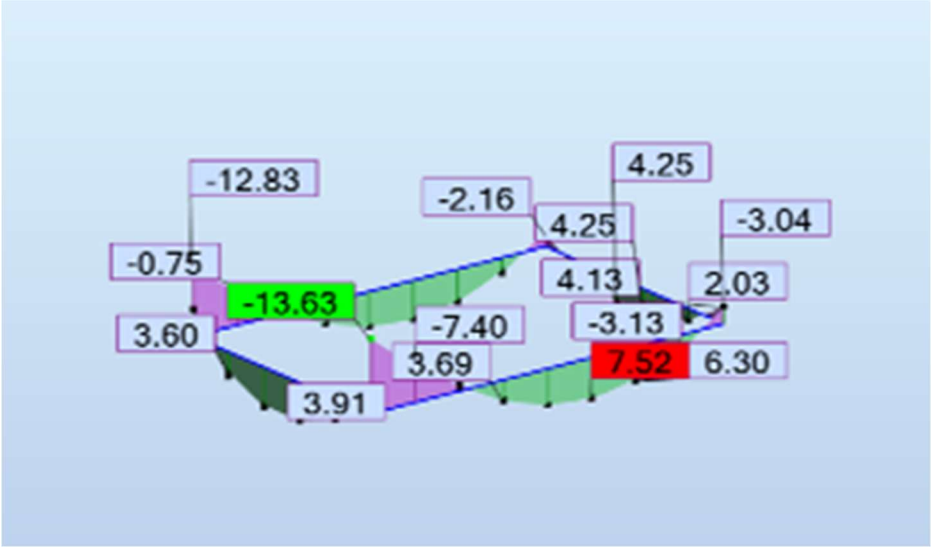


Figure 6 : Sollicitations des poutres

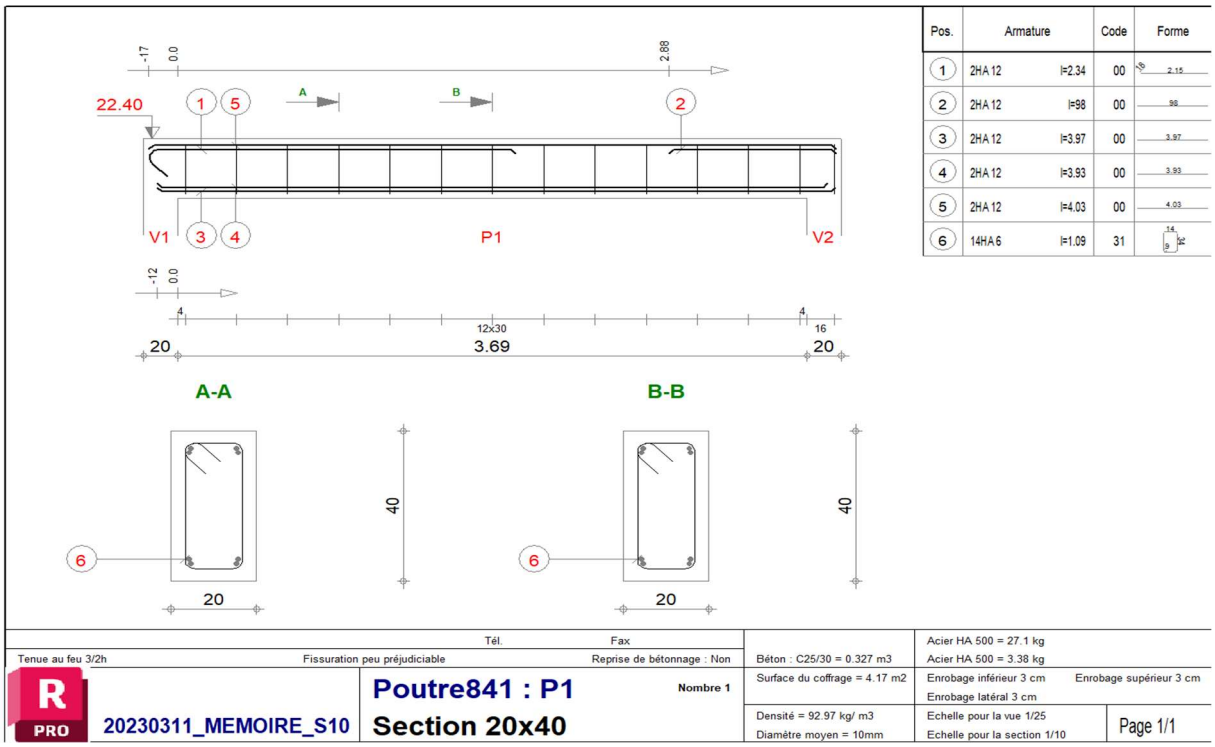


Figure 7 : Plan de ferraillage de poutre

IV.2.4. Dimensionnement des poteaux

Le dimensionnement des poteaux a pris en compte les efforts de compression et le flambement.

Les résultats montrent que les sections retenues sont suffisantes pour assurer la stabilité globale de la structure. Les armatures adoptées respectent les exigences du BAEL 91 révisé 99.

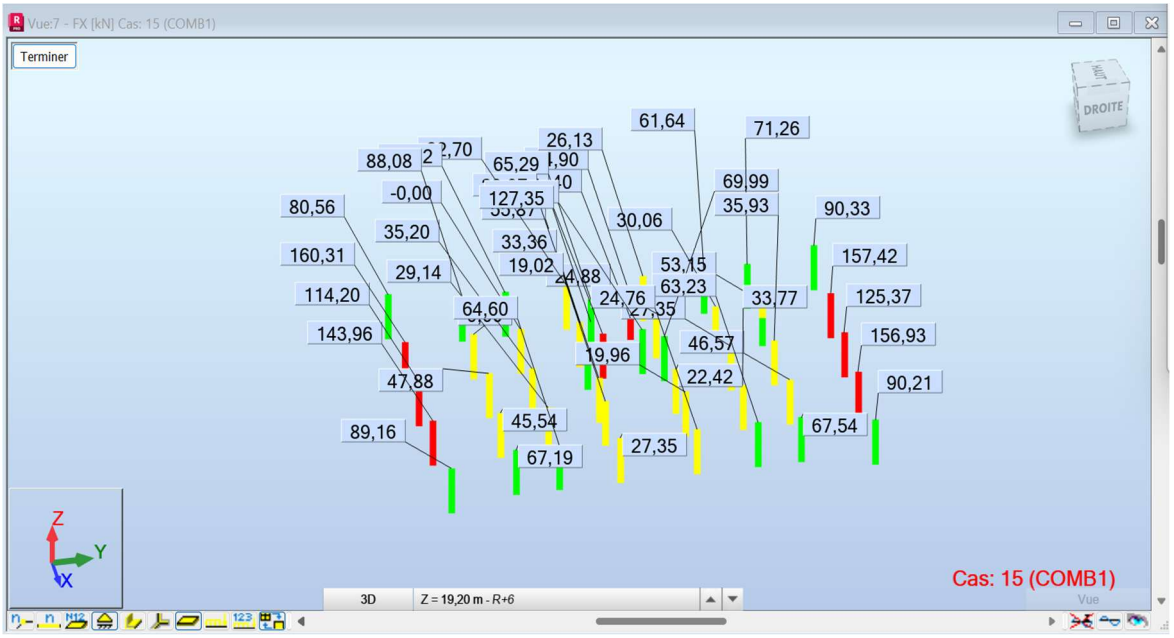


Figure 8 : Résultats des efforts sur poteaux

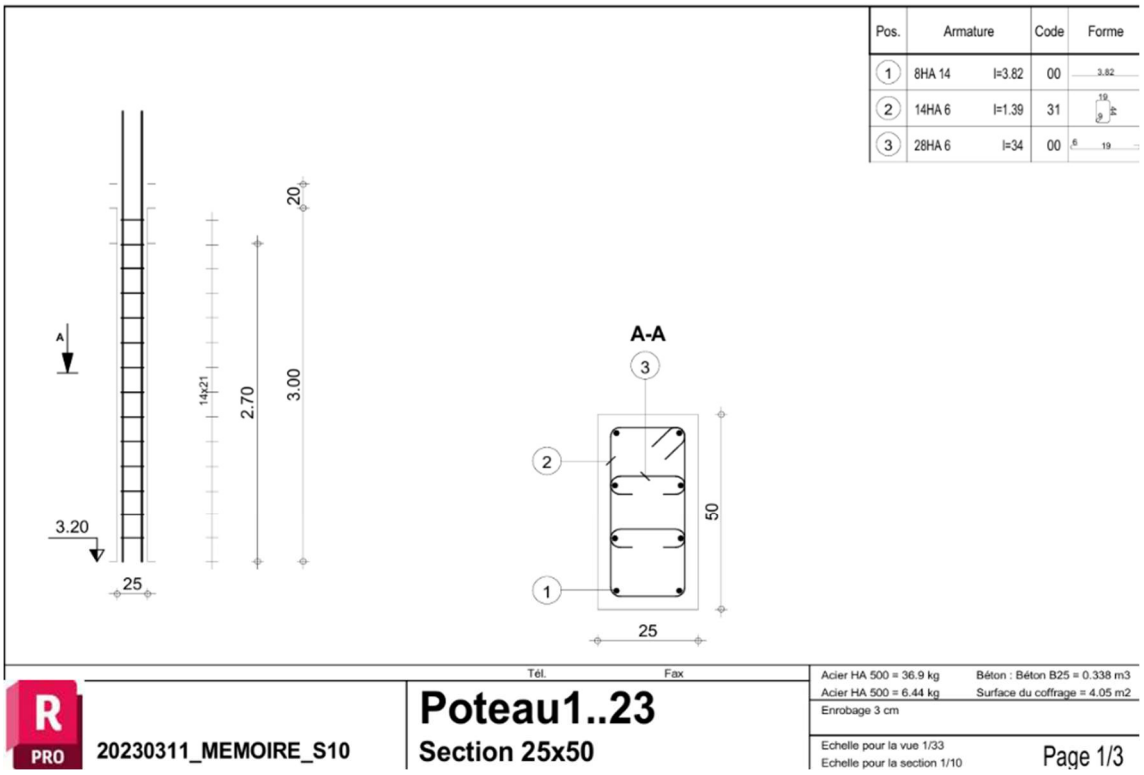


Figure 9 : Plan de Ferraillage de poteaux

IV.2.5. Modèle Analytique

Dans le cadre de la démarche BIM, le modèle analytique de Robot Structural Analysis a été exporté vers Autodesk Revit afin d'assurer la cohérence entre le calcul et la maquette numérique. Cette opération permet de vérifier la continuité du modèle structurel et d'améliorer la fiabilité du processus de conception.

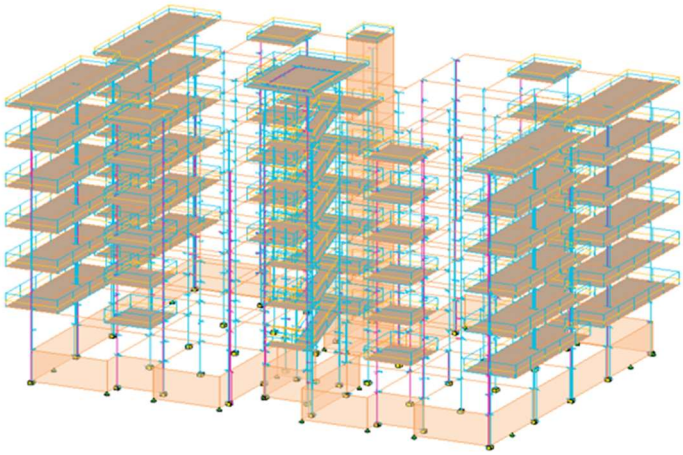


Figure 10 : Modèle Analytique RSA -Revit

IV.3. Résultats de la planification BIM 4D

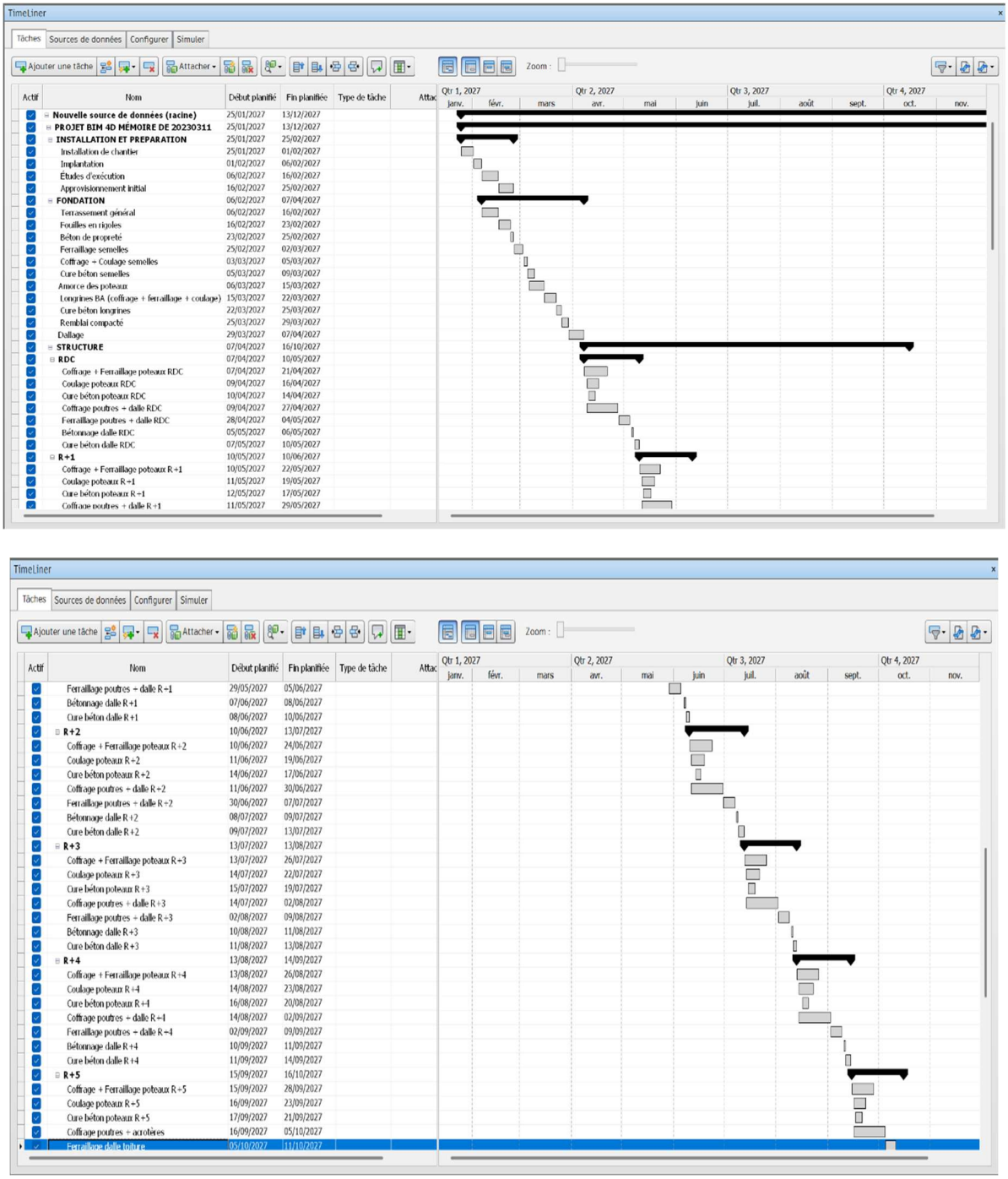


Figure 11 : Planning après liaison MS PROJECT- NAVISWORK

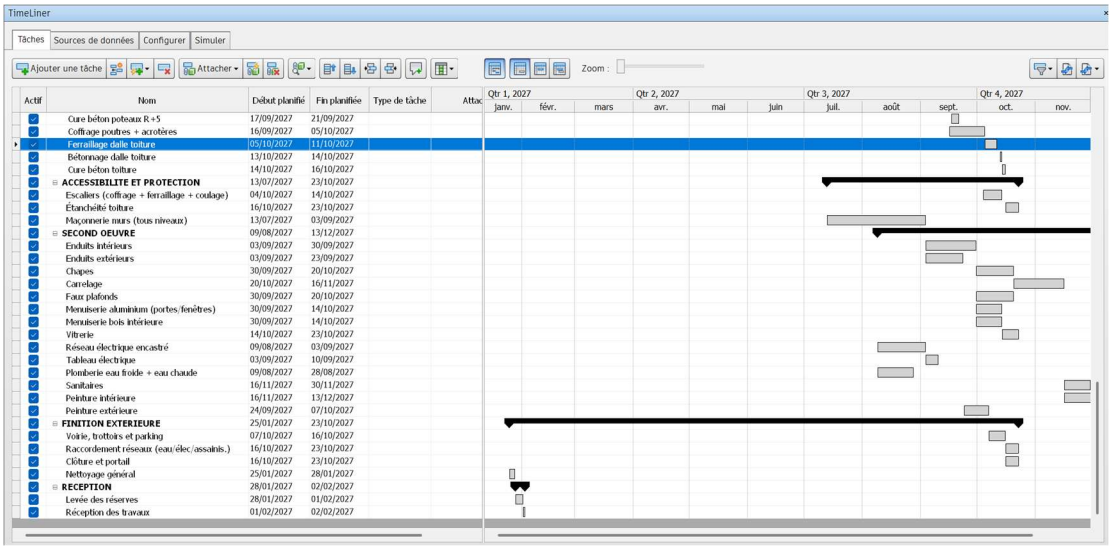




Figure 12 : Importation des Maquettes dans Navisworks

IV.3.1. Structure WBS et durées

La planification a été réalisée sous Microsoft Project avec une décomposition en tâches structurées selon un WBS. Le projet comprend les phases de préparation, fondations, élévation de la structure, second œuvre et finitions.

Cette organisation a permis d'obtenir un planning détaillé et cohérent avec les contraintes du chantier.

IV.3.2. Chemin critique et durée totale

Le chemin critique traverse les phases de fondations, d'élévation des niveaux et de réalisation de la toiture.

La durée totale du projet est déterminée par ces tâches critiques, qui conditionnent l'ensemble du planning.

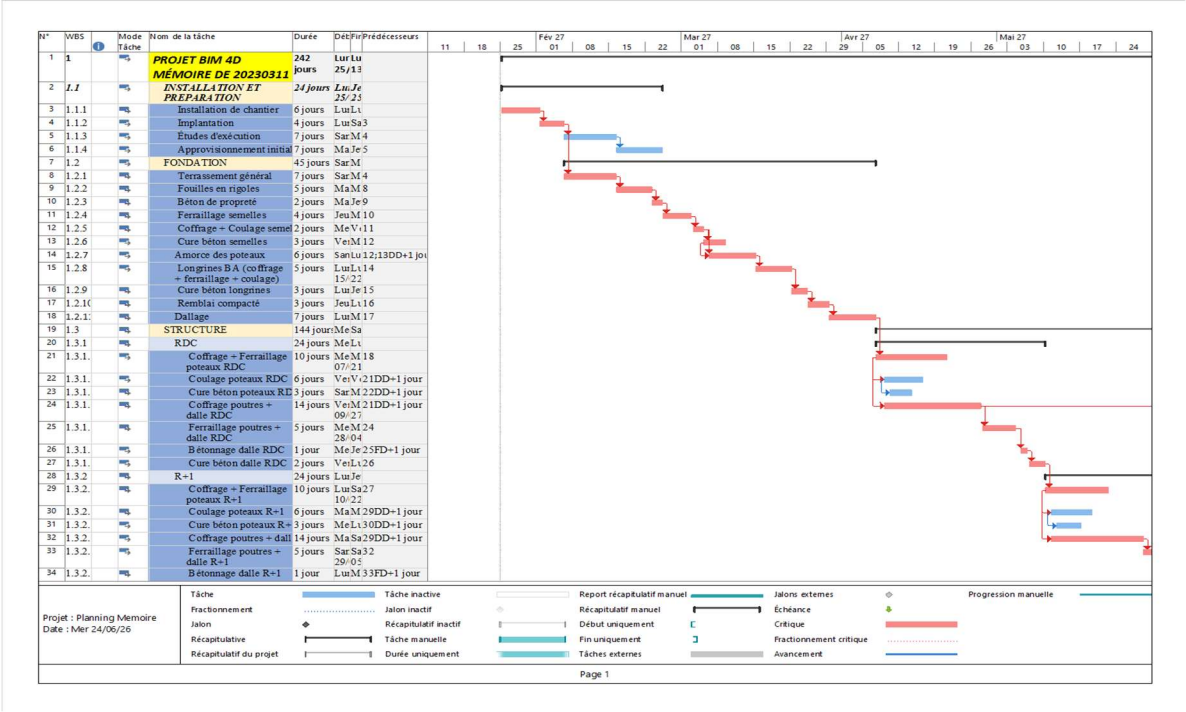


Figure 13 : Extrait de Planning sous Ms Project

Le chemin critique identifié par Microsoft Project traverse les tâches suivantes :

Phase de fondation

- Terrassement général ;
- Fouilles en rigoles ;
- Béton de propreté ;
- Ferraillage des semelles ;
- Coffrage et coulage des semelles ;
- Cure du béton des semelles ;
- Amorces des poteaux ;
- Longrines en béton armé ;
- Cure du béton des longrines ;
- Remblai compacté ;
- Dallage.

Phase structure RDC

- Coffrage et ferraillage des poteaux du RDC ;
- Coffrage des poutres et de la dalle du RDC ;
- Ferraillage des poutres et de la dalle du RDC ;
- Bétonnage de la dalle du RDC ;
- Cure du béton de la dalle du RDC.

Phase structure : R+1 ; R+2 ; R+3 ; R+4 ;R+5

- Coffrage et ferraillage des poteaux ;
- Coffrage des poutres et de la dalle ;
- Ferraillage des poutres et de la dalle ;
- Bétonnage de la dalle du R+1 ;
- Cure du béton de la dalle du R+1.

Phase de maçonnerie et second œuvre

- Maçonnerie des murs ;
- Réseau électrique encastré ;
- Enduits intérieurs ;
- Chapes ;
- Carrelage ;
- Peinture intérieure.

IV.3.3. Simulation 4D

La simulation 4D sous Navisworks permet de visualiser l'évolution du chantier dans le temps et de mieux comprendre le phasage des différentes étapes de construction.

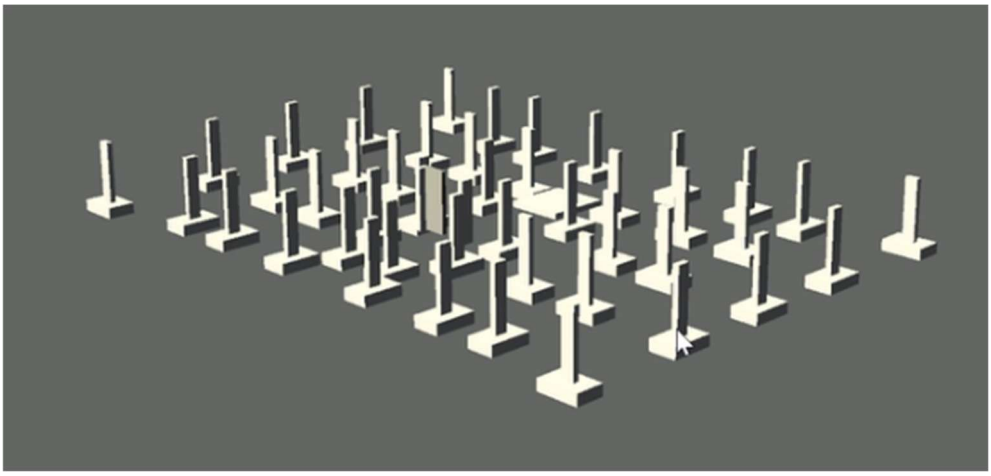


Figure 14 : Début de Fondation

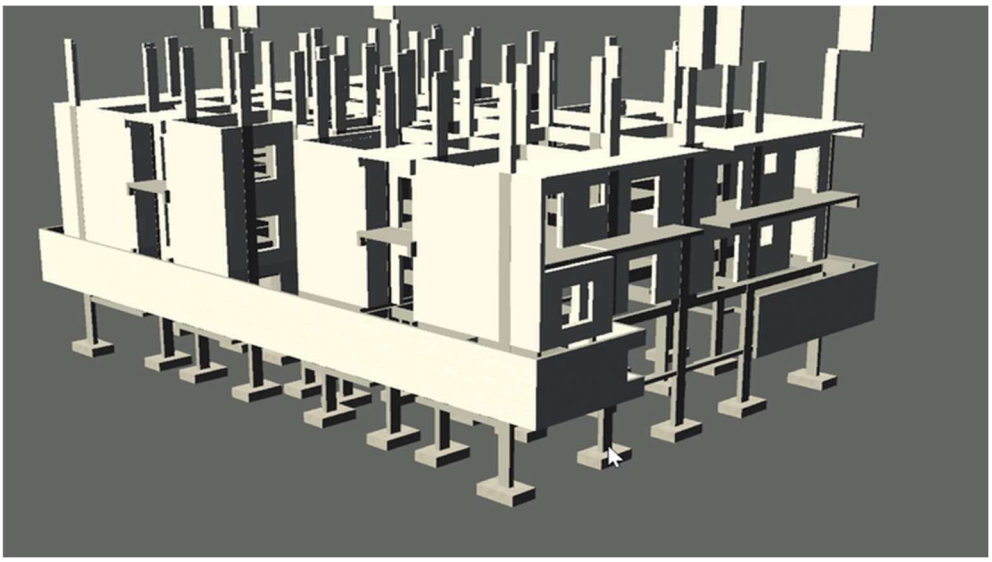


Figure 15 : Processus de construction



Figure 16 : Étape finale

IV.4. Résultats de l'estimation BIM 5D

IV.4.1. Quantités extraites depuis Revit

Les quantités ont été extraites automatiquement depuis Revit. Elles concernent les volumes de béton, les surfaces de coffrage, les armatures et les ouvrages de maçonnerie.

Cette extraction permet une estimation rapide et cohérente des quantités du projet.

Tableau 8 : Extraction de quantités

Niveau	Surface Murs 15 cm (m²)	Surface Murs 20 cm (m²)	Murs-Rideaux (m²)	Volume Poteaux (m3)	Volume Poutres (m3)
Infrastructure	-	-	-	15,58	15,77
RDC	487	207	-	19,98	27,9
R+1	451	433	-	19,98	28,65
R+2	447	425	-	19,98	28,65
R+3	447	433	-	19,98	23,51
R+4	449	426	-	13,12	23,99
R+5	234	303	88	13,12	19,23
R+6	-	163	-	0,84	0,75
TOTAL	**2515**	**2390**	**88**	**122,58**	**168,45**

IV.4.2. Bordereau Quantitatif et Estimatif (BQE)

Le BQE a été établi à partir des quantités extraites et des prix unitaires du marché d'Abidjan.

Le coût global du projet a été obtenu par regroupement des différents lots (fondations, structure, élévation et finitions). Cette méthode assure une traçabilité complète des coûts.

Tableau 9 : DQE réalisé avec Extraction de Quantité

GROS-ŒUVRE

N°	Désignations	Unite	Quantité	Prix unitaire	Prix total
A	Terrassements & préparation du chantier				
1	Amenée et repli de matériel	Ens	1	200 000	200 000
2	Fouilles en puit pour semelles isolées	m³	440	1 886	829 840

3	Fouilles en tranchée pour longrines	m³	12,3	1 162	14 299
4	Remblais sous dallage	m³	26,8	1 200	32 160
5	Remblais au droit des fondations avec terres extraites des fouilles	m³	339,1	1 505	510 285
6	Evacuation des déblais	m³	100,9	1 500	151 410
Sous Total Terrassements préparation					1 737 994
I/	**FONDATION**				
1	Béton de propreté Ep=5cm	m³	8,8	65 000	572 000
2	Béton dosé à 350kg/m3 pour semelles	m³	85,4	125 000	10 670 000
3	Béton dosé à 350kg/m3 pour longrines	m³	11	125 000	1 368 750
4	Béton dosé à 350kg/m3 pour amorce poteaux	m³	15,6	125 000	1 947 500
5	Béton dosé à 300kg/m3 pour dallage sol	m³	40,4	80 000	3 232 800
6	mur de soubassement en agglos pleins de 15	m²	243	6 045	1 468 979
Sous total fondation					19 260 029
II/	**RDC**				
1	Béton dosé à 350 kg/m3 pour poutres et poteaux	m³	43,7	125 000	5 458 750
2	Plancher hourdis 16+4	m²	317	9 500	3 011 500
3	Plancher dalle pleine	m³	30,7		
4	Maçonnerie d'agglos creux de 20cm	m²	207	5 048	
5	Maçonnerie d'agglos creux de 15cm	m²	487	5 048	2 458 376
6	Enduits intérieurs	m²	1056	1 500	1 584 000
7	Enduits extérieurs	m²	849	1 500	1 273 500
8	Enduits sous face	m²	393	1 500	589 500
Sous total RDC					14 375 626
III/	**ETAGE**				
1	Béton dosé à 350kg/m3 pour poutres et poteaux	m³	211,8	125 000	26 475 000
2	Plancher hourdis 16+4	m²	2841,2	9 500	26 991 638
3	Plancher dalle pleine	m³	161,6	9 500	1 534 725
4	Maçonnerie d'agglos creux de 20cm	m²	2020	9 500	19 190 000

5	Maçonnerie d'agglos creux de 15cm	m²	1845,9	5 048	9 318 255
6	Enduits intérieurs	m²	5557,9	5 048	28 056 077
7	Enduits extérieurs	m²	2337	1 500	3 505 500
8	Enduits sous face	m²	2922	1 500	4 383 000
Sous total ETAGE					119 454 194
IV/	**TERRASSE**				
1	Béton dosé à 350kg/m3 pour poutres et poteaux	m³	0,8	125 000	105 000
2	Acrotere	m³	37,1	5 048	187 180
3	Enduits intérieurs	m²	163	1 500	244 500
4	Enduits extérieurs	m²	163	1 500	244 500
5	Forme de Pente sur terrasse acessible	m²	192	3 025	580 800
Sous Total Terrasse					1 361 980
TOTAL GROS OEUVRE					156 189 823

IV.5. Analyse comparative BIM versus méthodes traditionnelles

Tableau 10 : DQE réalisé avec les plans 2D

GROS-ŒUVRE

N°	DESIGNATIONS	UNITE	QUANTITE	PRIX UNITAIRE	PRIX TOTAL
A	**TERRASSEMENTS&PREPARATION DU CHANTIER**				
1	Amenée et repli de matériel	Ens	1	200 000	200 000
2	Fouilles en puit pour semelles isolées	m³	460	1 886	867 560
3	Fouilles en tranchée pour longrines	m³	13	1 162	15 106
4	Remblais sous dallage	m³	28	1 200	33 600
5	Remblais au droit des fondations avec terres extraites des fouilles	m³	355	1 505	534 275
6	Evacuation des déblais	m³	105	1 500	157 500
Sous Total Terrassements préparation					1 808 041
I/	**FONDATION**				
1	Béton de propreté Ep=5cm	m³	9,2	65 000	598 000
2	Béton dosé à 350kg/m3 pour semelles	m³	89	125 000	11 125 000
3	Béton dosé à 350kg/m3 pour longrines	m³	11,8	125 000	1 475 000
4	Béton dosé à 350kg/m3 pour amorce poteaux	m³	16,5	125 000	2 062 500

5	Béton dosé à 300kg/m3 pour dallage sol	m³	42,7	80 000	3 416 000
6	mur de soubassement en agglos pleins de 15	m²	255	6 045	1 541 475
Sous total fondation					20 217 975
II/	**RDC**				
1	Béton dosé à 350kg/m3 pour poutres et poteaux	m³	47	125 000	5 875 000
2	Plancher hourdis 16+4	m²	334	9 500	3 173 000
3	Plancher dalle pleine	m³	220		
4	Maçonnerie d'agglos creux de 20cm	m²	520	5 048	
5	Maçonnerie d'agglos creux de 15cm	m²	1 135,00	5 048	5 729 480
6	Enduits intérieurs	m²	905	1 500	1 357 500
7	Enduits extérieurs	m²	420	1 500	630 000
8	Enduits sous face	m²	410,0	1 500	615 000
Sous total RDC					17 379 980
III/	**ETAGE**				
1	Béton dosé à 350kg/m3 pour poutres et poteaux	m³	226	125 000	28 250 000
2	Plancher hourdis 16+4	m²	3 065,00	9 500	29 117 500
3	Plancher dalle pleine	m³	173	9 500	1 643 500
4	Maçonnerie d'agglos creux de 20cm	m²	2 190,00	9 500	20 805 000
5	Maçonnerie d'agglos creux de 15cm	m²	2 010,00	5 048	10 146 480
6	Enduits intérieurs	m²	6 030,00	5 048	30 439 440
7	Enduits extérieurs	m²	2 490,00	1 500	3 735 000
8	Enduits sous face	m²	3 180,00	1 500	4 770 000
Sous total ETAGE					128 906 920
IV/	**TERRASSE**				
1	Béton dosé à 350kg/m3 pour poutres et poteaux	m³	0,9	125 000	112 500
2	Acrotere	m³	39	5 048	196 872
3	Enduits intérieurs	m²	175	1 500	262 500
4	Enduits extérieurs	m²	175	1 500	262 500
5	Forme de Pente sur terrasse acessible	m²	203	3 025	614 075
Sous Total Terrasse					1 448 447
TOTAL GROS OEUVRE					169 761 363

IV.5.1. Comparaison sur les délais (vérification de H1)

L'évaluation des délais d'exécution du projet R+5 a été faite à partir de la planification 4D dans BIM élaborée sous Navisworks Manage, couplée au modèle Revit. Cette simulation a permis

d'associer les tâches de construction aux éléments du modèle numérique, représentant ainsi dynamiquement la séquence d'exécution dans le temps.

La planification traditionnelle, basée sur des diagrammes de type Gantt en 2D, repose principalement sur une décomposition linéaire des tâches, sans représentation spatiale des interactions entre activités. La démarche BIM 4D, quant à elle, permet de visualiser simultanément l'espace et le temps, ce qui facilite l'identification des contraintes de phasage telles que les conflits d'accès, les chevauchements d'activités ou encore les incohérences de séquencement entre lots techniques et structurels.

Cette étude a permis de mettre en évidence, par le biais de la simulation 4D, plusieurs points critiques du planning, notamment des zones de superposition entre les travaux de structure et les interventions des corps d'état secondaires. Ces conflits potentiels ont été corrigés en phase de planification, par réorganisation des séquences d'exécution et ajustement des durées d'intervention, évitant ainsi des interruptions de chantier et des reprises.

Par ailleurs, la visualisation 4D a permis d'optimiser la logique constructive par niveau, en améliorant l'enchaînement des phases de bétonnage, de maçonnerie et de second œuvre. Cette optimisation a conduit à une réduction des temps morts liés aux conflits d'interface et à une meilleure continuité des équipes sur chantier.

Selon la littérature, le BIM 4D contribue significativement à la réduction des délais de projet grâce à la détection précoce des conflits de planification et à l'amélioration de la coordination temporelle des tâches. Dans cette logique, les résultats observés dans le projet confirment que la simulation 4D agit comme un outil d'optimisation du phasage plutôt que comme un simple outil de représentation [24].

Vérification de H1

Les simulations réalisées à partir de la maquette numérique ont permis d'identifier en amont plusieurs interférences entre les différents corps d'état. Cette détection précoce facilite la coordination des intervenants et permet d'anticiper les ajustements nécessaires avant le démarrage des travaux. Par ailleurs, l'association du modèle BIM au planning d'exécution offre une meilleure visualisation du séquencement des tâches et contribue à une organisation plus cohérente du chantier.

V.5.2. Comparaison sur la précision budgétaire (vérification de H2)

La comparaison des coûts entre la méthode BIM 5D et la méthode traditionnelle repose sur l'analyse détaillée des quantités extraites de la maquette numérique et celles obtenues par métré manuel à partir des plans 2D.

Les résultats du devis montrent que le coût total estimé par la méthode BIM est de 156 189 823 FCFA, contre 168 854 903 FCFA pour la méthode traditionnelle, soit un écart global de 12 665 080 FCFA représentant environ 8,11 %.

L'analyse détaillée des postes de travaux révèle que les écarts sont plus faibles sur les ouvrages simples tels que les terrassements et les fondations, où les différences se situent entre 4 % et 6 %. En revanche, les écarts deviennent plus importants sur les éléments répétitifs du bâtiment, notamment les maçonneries, les enduits et les planchers, avec des variations atteignant jusqu'à 9 %.

Cette tendance s'explique par les limites du métré manuel, qui est sujet aux erreurs d'omission, aux doubles comptages et aux approximations liées à la répétitivité des éléments structurels. À l'inverse, l'approche BIM 5D permet une extraction automatique et cohérente des quantités directement à partir du modèle numérique.

Vérification de H2

L'hypothèse H2 postulait que l'utilisation du BIM améliore la précision des estimations budgétaires par rapport aux méthodes traditionnelles.

Les résultats obtenus montrent un écart global maîtrisé de 8,11 %, situé dans la plage de 5 à 15 % généralement admise dans la littérature [24]Cet écart confirme que la méthode BIM permet une meilleure fiabilité des quantités et une réduction significative des erreurs de métré.

Par conséquent, l'hypothèse H2 est vérifiée.

IV.5.3. Analyse de la coordination (vérification de H3)

L'analyse de la coordination dans le projet a été réalisée à partir de la détection des conflits (clash détection) entre les disciplines modélisées, à savoir l'architecture et la structure. Cette approche repose sur les principes du BIM, qui permettent d'intégrer les modèles disciplinaires dans un environnement unique afin d'identifier automatiquement les incohérences géométriques et techniques avant la phase d'exécution.

L'utilisation de Navisworks Manage a permis de mettre en évidence plusieurs conflits de coordination, notamment des interférences entre éléments structurels (poutres, poteaux, dalles) et des incohérences liées à la superposition ou au positionnement de certains éléments architecturaux. Ces conflits ont été corrigés en phase de conception, avant toute exécution sur chantier.

Dans une approche traditionnelle, la coordination entre l'architecture et la structure repose principalement sur des plans 2D et des vérifications manuelles, ce qui limite la capacité à anticiper certaines interférences spatiales. Par conséquent, plusieurs erreurs ne sont généralement détectées qu'en phase d'exécution, entraînant des reprises de travaux, des surcoûts et des retards.

Les résultats de la modélisation BIM confirment les conclusions de Salman Azhar [24]selon lesquelles la modélisation de l'information du bâtiment améliore significativement la coordination entre disciplines grâce à la détection automatique des conflits, réduisant ainsi les risques d'erreurs et de reprises en chantier.

Dans ce projet, même en limitant la coordination aux disciplines architecture et structure, l'approche BIM a permis une meilleure cohérence du modèle, une réduction des incohérences spatiales et une anticipation des problèmes d'exécution.

Vérification de H3

L'hypothèse H3 stipulait que le BIM améliore la coordination interdisciplinaire et réduit les conflits en phase d'exécution.

Les résultats obtenus montrent que plusieurs conflits ont été détectés et résolus en phase de conception grâce à la coordination BIM entre l'architecture et la structure. Ces conflits auraient été difficilement identifiables dans une approche traditionnelle basée sur des plans 2D.

Ainsi, même avec un périmètre disciplinaire limité (architecture–structure), le BIM améliore la qualité de la coordination et réduit significativement les risques de non-conformité en phase d'exécution. L'hypothèse H3 est donc validée.

CHAPITRE V. DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Dans ce chapitre sont discutés les principaux résultats obtenus afin d'en dégager les apports, les limites et les implications de l'étude. Des recommandations sont ensuite formulées en vue d'améliorer l'intégration de la démarche BIM, avant de présenter les perspectives de recherche.

V.1. Discussion des résultats

V.1.1. Modélisation BIM 3D

La modélisation BIM 3D réalisée sous Revit 2025 a confirmé la faisabilité de l'approche BIM dans le contexte opérationnel de B2E Concept. Elle a permis de centraliser l'ensemble des données géométriques et techniques du projet dans une maquette numérique unique, garantissant une meilleure coordination entre les disciplines architecture et structure.

L'un des apports majeurs réside dans la capacité du modèle à améliorer la visualisation globale du projet et à anticiper les incohérences de conception. La détection automatique des conflits a permis d'identifier des erreurs géométriques entre éléments structuraux et architecturaux, qui auraient été détectées tardivement en méthode conventionnelle, avec des impacts potentiels sur les coûts et les délais.

Par ailleurs, la structuration des données sous forme de familles paramétriques a facilité la génération automatique des nomenclatures, améliorant ainsi la traçabilité des éléments et la fiabilité des informations techniques utilisées pour les phases ultérieures du projet.

V.1.2. Dimensionnement structurel

L'intégration du dimensionnement structurel dans la chaîne BIM, via l'interopérabilité entre Revit et Robot Structural Analysis, constitue un gain significatif en termes de continuité numérique. Elle permet de limiter les ressaisies manuelles et de réduire les risques d'erreurs liés au transfert des données géométriques.

Cependant, cette interopérabilité présente encore des limites techniques. Des pertes d'informations peuvent survenir lors des échanges IFC, nécessitant des ajustements manuels du modèle analytique. De plus, les modifications effectuées dans l'un des logiciels ne sont pas toujours automatiquement répercutées dans l'autre, ce qui peut générer des incohérences si le flux de travail n'est pas rigoureusement contrôlé.

Malgré ces contraintes, cette approche reste plus fiable que le processus traditionnel séquentiel, car elle améliore la cohérence globale entre conception architecturale et calcul structurel.

V.1.3. BIM 4D

La planification BIM 4D a permis de transformer un planning classique en une représentation dynamique du processus constructif. L'association du modèle 3D avec les tâches du projet a facilité la compréhension des enchaînements de travaux et la visualisation de l'évolution du chantier dans le temps.

Les résultats du Chapitre V montrent que cette approche permet d'identifier plus facilement les zones de conflit temporel entre corps d'état, notamment entre le gros œuvre et les travaux de second œuvre. Ces conflits, difficilement perceptibles dans un planning 2D classique, peuvent être anticipés et corrigés avant le démarrage du chantier.

Ainsi, le BIM 4D améliore la qualité de la planification et renforce la capacité de coordination des intervenants. Toutefois, son efficacité dépend fortement de la qualité du découpage WBS et de la précision des durées affectées aux tâches.

V.1.4. BIM 5D

L'approche BIM 5D a permis d'automatiser l'extraction des quantités à partir de la maquette Revit, ce qui constitue un gain important en termes de rapidité et de traçabilité par rapport aux méthodes traditionnelles de métré.

Les résultats du Chapitre V montrent que cette automatisation améliore la cohérence des estimations et limite les erreurs d'omission fréquemment observées dans les métrés manuels. Les postes les plus sensibles aux écarts sont généralement ceux présentant une géométrie complexe ou des répétitions importantes sur plusieurs niveaux.

Toutefois, la précision du BIM 5D reste dépendante du niveau de développement du modèle (LOD 300 dans cette étude). L'absence de modélisation détaillée de certains éléments, notamment les armatures, constitue une limite à la précision de l'estimation finale.

V.2. Recommandations

V.2.1. Pour B2E Concept

Au regard des résultats obtenus dans cette étude, plusieurs recommandations opérationnelles peuvent être formulées afin d'améliorer l'intégration du BIM au sein de B2E Concept.

Il est d'abord recommandé de formaliser une BIM Execution Plan (BEP) pour l'ensemble des projets de bâtiment, en particulier ceux de niveau R+3 et plus. Ce document devra définir de manière claire les objectifs BIM, le niveau de développement (LOD) attendu, les responsabilités des intervenants, ainsi que les procédures d'échange et de validation des modèles.

Ensuite, le renforcement des compétences internes constitue un levier essentiel. Une formation continue ciblée sur les logiciels Revit, Robot Structural Analysis et Navisworks permettrait d'améliorer la maîtrise des outils BIM par les ingénieurs et techniciens, notamment dans les phases de conception et de coordination.

Il est également recommandé de développer une bibliothèque de familles BIM standardisées, adaptées aux pratiques constructives locales (poteaux BA, poutres, dalles, longrines). Cette base de données permettrait de réduire les temps de modélisation et d'améliorer la cohérence des projets futurs.

Par ailleurs, la mise en place d'un système de gestion des données commun (CDE – Common Data Environment) est indispensable pour assurer la centralisation, la traçabilité et la mise à jour des informations tout au long du cycle de vie du projet.

Enfin, l'intégration progressive du BIM dans les pratiques contractuelles, notamment à travers des clauses BIM dans les marchés de maîtrise d'œuvre, permettrait d'assurer une adoption plus structurée et durable de cette méthodologie.

V.2.2. Pour le secteur de la construction

À l'échelle du secteur de la construction, les résultats de cette étude mettent en évidence la nécessité d'une transition numérique progressive mais structurée.

Il est recommandé de développer un référentiel BIM national, adapté aux réalités locales, tout en s'inspirant des standards internationaux existants. Ce référentiel devrait intégrer les normes de calcul utilisées localement ainsi que les pratiques de construction courantes.

L'introduction progressive du BIM dans les programmes de formation des écoles d'ingénieurs constitue également un axe prioritaire. La maîtrise des outils numériques dès le cycle universitaire permettrait de préparer une nouvelle génération d'ingénieurs directement opérationnels sur les projets BIM.

Par ailleurs, les institutions publiques, notamment le BNETD et le ministère en charge de la construction, pourraient jouer un rôle moteur en intégrant progressivement l'exigence de maquettes BIM dans les appels d'offres des projets publics.

Enfin, la création d'un cadre de diffusion des bonnes pratiques BIM en Afrique permettrait de capitaliser les expériences existantes et d'accélérer la montée en compétence des bureaux d'études.

V.2.3. Perspectives

Cette étude ouvre plusieurs perspectives de recherche et de développement.

Il serait pertinent d'étendre la démarche BIM aux dimensions 6D et 7D, notamment pour intégrer les aspects de performance énergétique, de maintenance et de gestion du cycle de vie du bâtiment.

Une étude comparative basée sur des données réelles de chantier permettrait également de mesurer de manière plus précise les gains économiques et temporels liés à l'adoption du BIM.

Enfin, l'application du BIM à des projets d'infrastructure (routes, réseaux, assainissement) constitue un axe de recherche prometteur dans le contexte ivoirien, où ces domaines restent encore peu explorés.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de ce travail, il apparaît clairement que la transition numérique constitue un levier structurant de modernisation du secteur BTP en Côte d'Ivoire. Dans un contexte urbain encore marqué par des retards de livraison, des dépassements budgétaires et des difficultés de coordination, cette étude a démontré, de manière concrète et chiffrée, l'apport du BIM à travers l'étude d'un immeuble résidentiel R+5 à Abidjan.

La chaîne numérique intégrée mise en place de la modélisation sous Revit 2025 au dimensionnement structural sous Robot, en passant par la planification 4D sous Navisworks et l'estimation 5D sous Excel a permis de valider les trois hypothèses de recherche :

Optimisation des délais : La simulation 4D a permis d'anticiper les conflits entre corps d'état et de réduire les risques d'interruption de chantier.

Fiabilisation des coûts : L'écart de 8,11 % entre le métré BIM (156 189 823 FCFA) et le métré manuel (168 854 903 FCFA) confirme la supériorité des quantitatifs numériques en termes de précision.

Amélioration de la coordination : La détection des conflits a permis de résoudre en phase conception des interférences qui auraient généré des surcoûts importants en chantier.

L'étude soulève néanmoins des limites réelles : pertes d'information lors des échanges interopérables, coût des licences, manque de formation et absence de cadre normatif national. Ces freins conditionnent encore largement l'adoption du BIM sur le marché africain.

En perspective, l'extension vers le BIM 6D (performance énergétique) et le BIM 7D (gestion et maintenance) ouvre des prolongements naturels à ce travail, dans l'objectif d'accompagner les ambitions du Plan National de Développement face aux défis de l'urbanisation rapide des villes africaines.

BIBLIOGRAPHIE

[1] V. Zoma, A. Kiemdé, et E. G. Kabran, « Les métropoles africaines. Enjeux et défis de développement ».

[2] K. Kobenan Marc, T. Péga, et A. Kouassi Paul, « EXPANSION URBAINE PERIPHERIQUE ET EVOLUTION DE L'OFFRE DE SOINS DE SANTE DANS LE NORD DE LA COMMUNE D'ABOBO A ABIDJAN (COTE D'IVOIRE) », nov. 2023, doi: 10.5281/ZENODO.10161245.

[3] C. M. Eastman, *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons, 2011.

[4] M. Abubakar, Y. M. Ibrahim, D. Kado, et K. Bala, « Contractors' Perception of the Factors Affecting Building Information Modelling (BIM) Adoption in the Nigerian Construction Industry », in *Computing in Civil and Building Engineering (2014)*, Orlando, Florida, United States: American Society of Civil Engineers, juin 2014, p. 167-178.

[5] Abidjan , *Wikipédia*. 7 juin 2026. Consulté le: 7 juin 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Abidjan&oldid=236845219

[6] T. A. Tiyegbo, H. Celestin, K. N. H. Joseph, A. N. Jérôme, et B. Thomas, « SECRETARIAT DE PUBLICATION Directeur de publication : Directeur de l'Institut de Géographie Tropicale (IGT) », 2007.

[7] Plan_National_de_Développement_PND_2021-2025_(TOME_1) ». Disponible sur: https://partenariat.gouv.ci/uploads/document/Plan_National_de_D%C3%A9veloppement_PND_2021-2025_%28TOME_1%29-compress%C3%A9.pdf?download=1&utm_source=chatgpt.com

[8] *BIM Handbook*.. Disponible sur: https://books.google.com/books/about/BIM_Handbook.html?hl=fr&id=IU9mDwAAQBAJ

[9] «BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers ... - Charles M. Eastman - Google Livres ».

[10] X. Pan, A. Mateen Khan, S. M. Eldin, F. Aslam, S. Kashif Ur Rehman, et M. Jameel, « BIM adoption in sustainability, energy modelling and implementing using ISO 19650:

A review », *Ain Shams Eng. J.*, vol. 15, nº 1, p. 102252, janv. 2024, doi: 10.1016/j.asej.2023.102252.

[11] «Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders , *Autom. Constr.*, vol. 18, nº 3, p. 357-375, mai 2009, doi: 10.1016/j.autcon.2008.10.003.

[12] S. Azhar, « Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry », *Leadersh. Manag. Eng.*, vol. 11, nº 3, p. 241-252, juill. 2011, doi: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127.

[13] Building Information Modeling: Why? What? How? | Springer Nature Link .. Disponible sur: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-92862-3_1

[14] *BIM Handbook*. Consulté le: 25 juillet 2026. Disponible sur: https://books.google.com/books/about/BIM_Handbook.html?hl=fr&id=-GjrBgAAQBAJ

[15] « Implementing information systems with project teams using ethnographic–action research », *Adv. Eng. Inform.*, vol. 23, nº 1, p. 57-67, janv. 2009, doi: 10.1016/j.aei.2008.06.006.

[16] G. E. G. González, G. O. Hernández, et F. Roldán, « Effect of Network's Morphology and Merge Bias Correction Procedures on Project Duration Mean and Variance », *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 119, p. 2-11, mars 2014, doi: 10.1016/j.sbspro.2014.03.003.

[17] « The-Use-of-Computers-Instead-of-Drawings-in-Building-Design.pdf ».Disponible sur: https://www.researchgate.net/profile/Charles-Eastman/publication/234643558_The_Use_of_Computers_Instead_of_Drawings_in_Building_Design/links/54aff5690cf2431d3531c7a7/The-Use-of-Computers-Instead-of-Drawings-in-Building-Design.pdf

[18] F. G. B. Blanco et H. Chen, « The Implementation of Building Information Modelling in the United Kingdom by the Transport Industry », *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 138, p. 510-520, juill. 2014, doi: 10.1016/j.sbspro.2014.07.232.

[19] B. Chaudet, « Le BIM : nouvelles formes de collaboration pour les acteurs du bâtiment ? », *Interfaces Numér.*, vol. 8, nº 3, avr. 2020,

[20] Building Information Modeling (BIM) SmartMarket Report . Disponible sur: https://users.wpi.edu/~salazar/BIMForumAcademicEMorse/downloads/cs/sustainability/mhc_bim_smartmarket.pdf

[21] Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders , *Autom. Constr.*, vol. 18, nº 3, p. 357-375, mai 2009,

[22] *Sustainable Construction Management: Research and Practice Companion*. Disponible sur: https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-96-4910-5

[23] *BIM Handbook*. Disponible sur: https://books.google.com/books/about/BIM_Handbook.html?hl=fr&id=-GjrBgAAQBAJ

[24] S. Azhar, « Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry », *Leadersh. Manag. Eng.*, vol. 11, nº 3, p. 241-252, juill. 2011.

ANNEXES

Annexe 1 : Documents techniques du projet étudié I

Annexe 2 : Étude structurelle VI

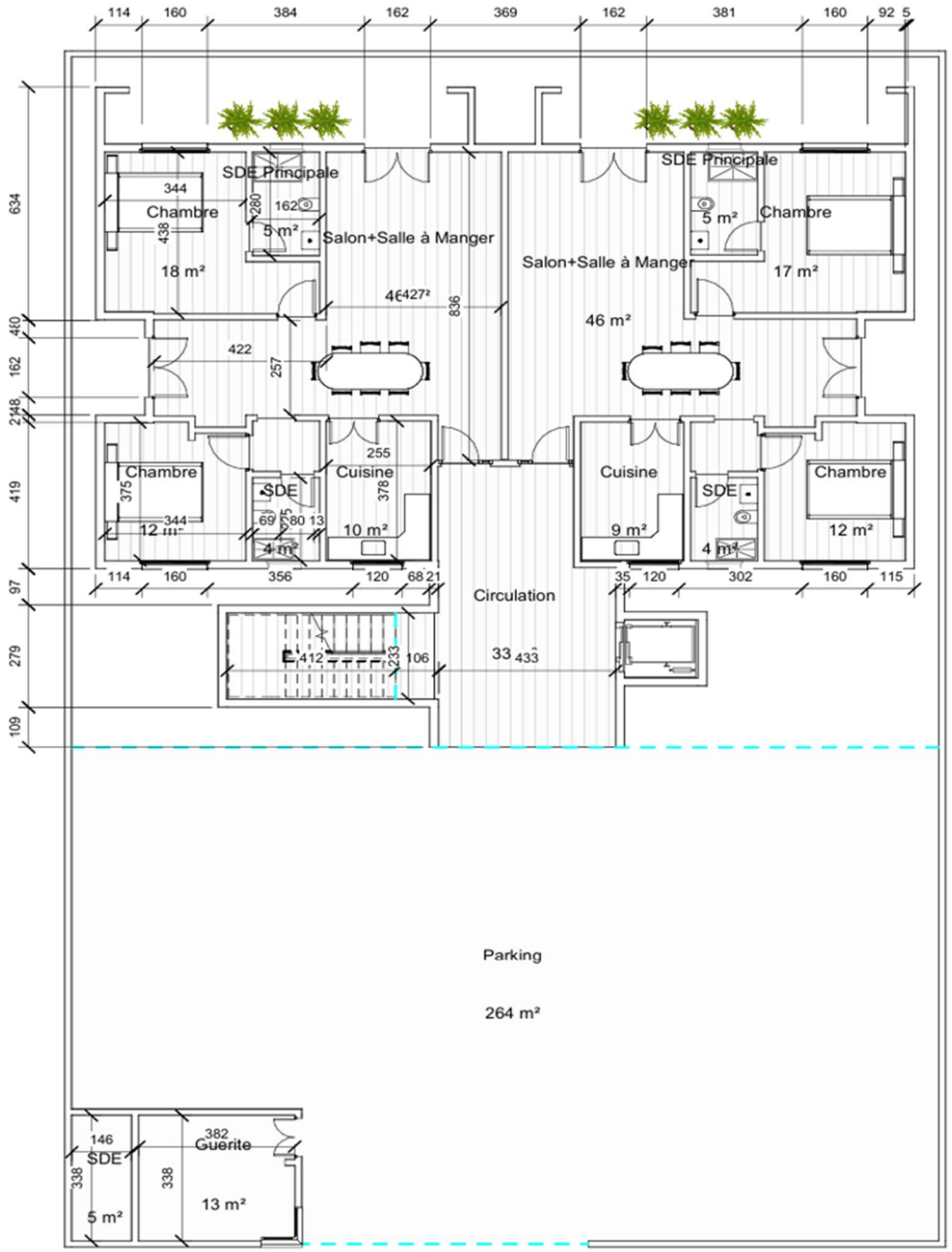
Annexe 3 : Modélisation BIM XLIII

Annexe 4 : BIM 4D - Planification XLIV

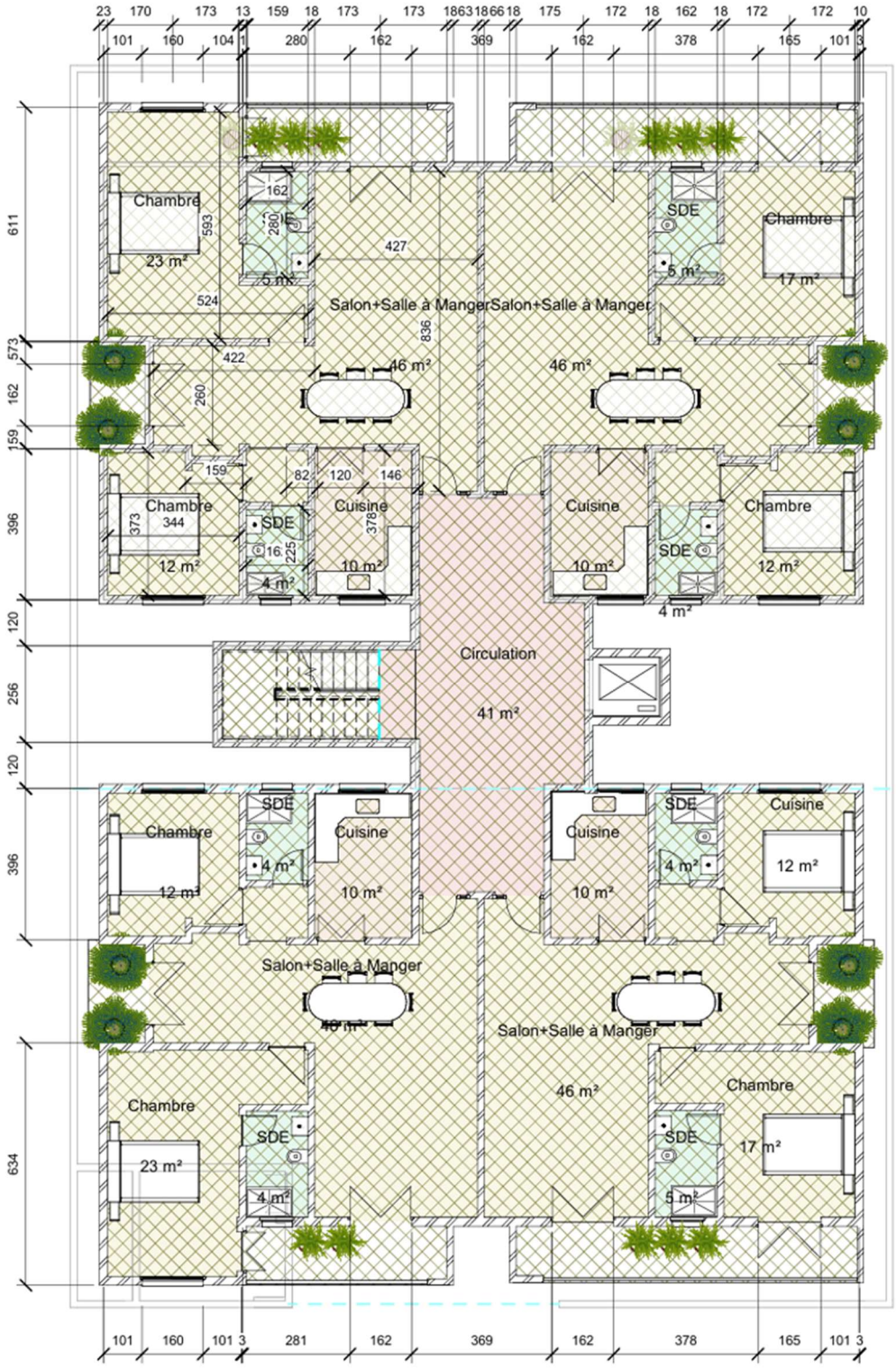
Annexe 5 : BIM 5D - Estimation des coûts L

Annexe 6 : Détection des conflits LIII

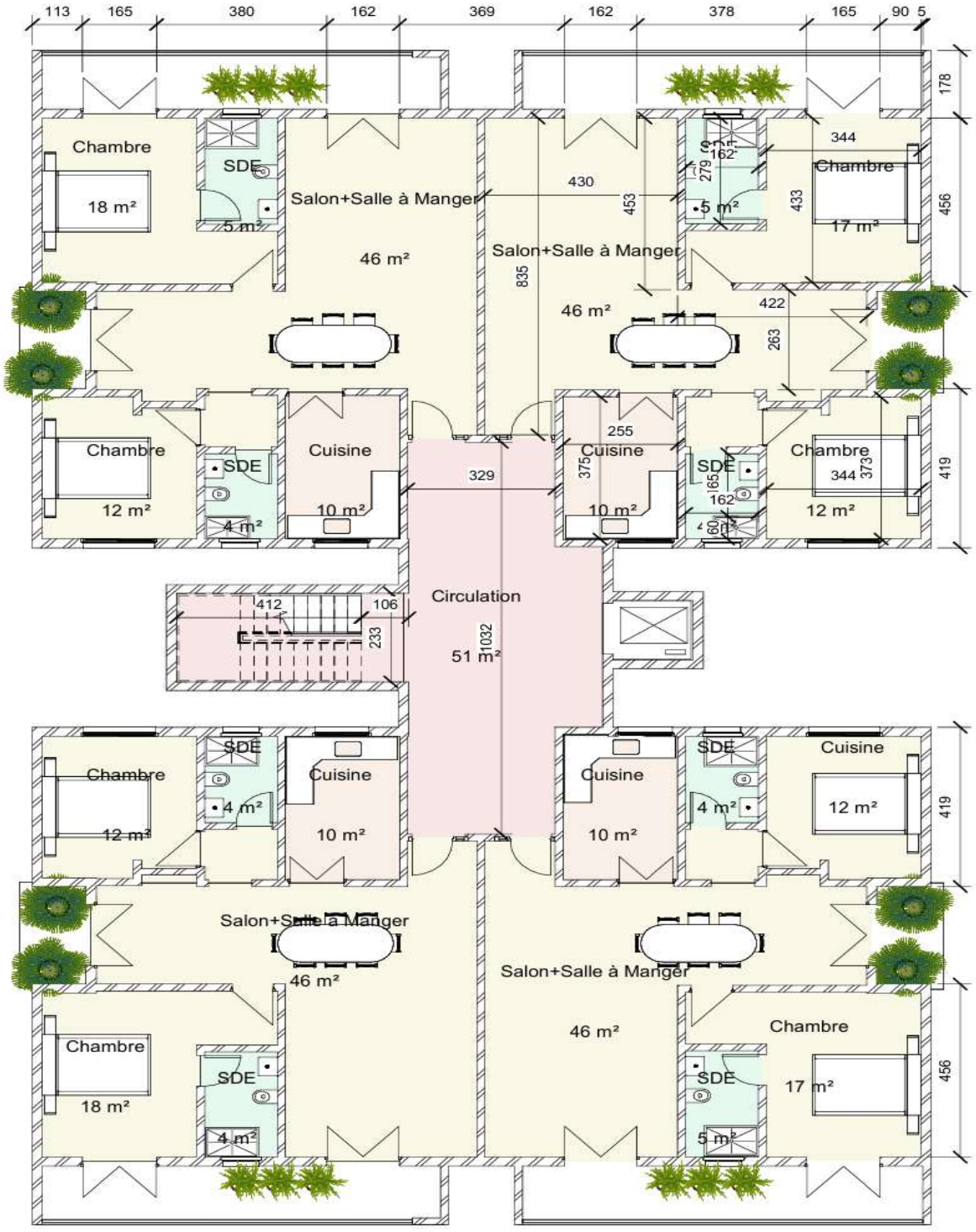
Annexe 1 : Documents techniques du projet étudié



VUE EN PLAN RDC



VUE EN PLAN R+1 et R+3



VUE EN PLAN R+2 et R+4



VUE EN PLAN PENTHOUSE



Coupe longitudinale



Coupe transversale



VUE 3D MAQUETTE ARCHITECTURALE

Annexe 2 : Étude structurelle

HYPOTHÈSES DE CALCUL

Cette étude structurelle est réalisée dans le cadre du dimensionnement d'un bâtiment R+5 en béton armé, situé à Abidjan-Bingerville. Les calculs sont établis conformément aux prescriptions du BAEL 91 révisé 99, avec référence aux principes de l'Eurocode 2 (EN 1992-1-1) pour les vérifications complémentaires. Les charges sont supposées uniformément réparties sur les éléments porteurs. Une distinction stricte est faite entre charges permanentes (G) et charges d'exploitation (Q).

Paramètre	Valeur retenue
Résistance caractéristique du béton (fc28)	25 MPa - Classe C25/30
Module de déformation du béton (Eij)	32 164 MPa
Type d'acier	HA Fe500 (Haute Adhérence)
Limite d'élasticité de l'acier (fe)	500 MPa
Module d'élasticité de l'acier (Es)	200 000 MPa
Coefficient de sécurité béton (γb)	1,5 (situation durable)
Coefficient de sécurité acier (γs)	1,15 (situation durable)
Combinaison ELU	Nu = 1,35 G + 1,5 Q
Combinaison ELS	Ns = G + Q
Hauteur d'étage constante (L_0)	3,20 m
Longueur de flambement ($L_f = 0,7 \times L_0$)	2,24 m
Enrobage des armatures	3 cm (milieu non agressif)
Vitesse de vent (zone Abidjan)	28 m/s
Normes de référence	BAEL 91 rév. 99

La combinaison fondamentale aux États Limites Ultimes (ELU) est : Nu = 1,35 G + 1,5 Q, conformément au BAEL 91 Art. A.3.3.

Règles empiriques (BAEL 91 révisé 99)

Le prédimensionnement des dalles est conduit selon les règles pratiques dérivées du BAEL 91, qui distinguent deux configurations en fonction du rapport de portées lx/ly :

Paramètre	Dalle unidirectionnelle	Dalle bidirectionnelle
Condition	lx/ly < 0,40	lx/ly ≥ 0,40 (cas courant)
Portée de référence	ly (grande portée)	lx (petite portée)
Épaisseur minimale	h ≥ ly / 20	h ≥ lx / 25
Portée retenue pour le projet		lx = 4,58 m / ly = 3,68 m
Calcul h = lx / 25		4 580 / 25 = 183 mm ≈ 18 cm
Épaisseur retenue		h = 20 cm (corps creux 16+4)

Application numérique : Dalles du projet

Les dalles du projet présentent les portées générales suivantes : lx = 3,68 m et ly = 4,58 m.

Rapport lx / ly = 3,68 / 4,58 = 0,80 ≥ 0,40 Dalle bidirectionnelle

h ≥ lx / 25 = 3 680 / 25 = 147 mm ≈ 15 cm

Par mesure de sécurité et compte tenu de l'interopérabilité avec les corps creux disponibles sur le marché ivoirien, l'épaisseur retenue est :

h = 20 cm → Dalle en corps creux (16 + 4 cm de table de compression) et dalle pleine.

Cette valeur est supérieure au minimum réglementaire et cohérente avec les portées du bâtiment. Elle a été conservée dans la modélisation sous Autodesk Robot Structural Analysis.

PRÉDIMENSIONNEMENT DES POUTRES

1. Règles empiriques appliquées (BAEL 91 révisé 99)

Le prédimensionnement des poutres est réalisé selon les formules empiriques du BAEL 91, qui définissent un intervalle de hauteur en fonction de la portée et du type de liaison :

Poutre isostatique : L/15 ≤ h ≤ L/10 ; b ≥ max (h/2 ; 15 cm)

Poutre hyperstatique : Lmax/15 ≤ h ≤ Lmax/10 ; b ≥ max (h/2 ; 15 cm)

2. Application numérique

2.1 Poutre isostatique — portée L = 2,00 m

L/15 = 0,13 m ; L/10 = 0,20 m → h retenu = 20 cm

b = h/2 = 10 cm → b retenu = 20 cm (contrainte de coffrage)

2.2 Poutre hyperstatique — portée Lmax = 5,00 m

Lmax/15 = 0,33 m ; Lmax/10 = 0,50 m → h calculé = 41,7 cm → h retenu = 40 cm

b = h/2 = 20 cm → b retenu = 25 cm

3. Récapitulatif - Sections adoptées

Paramètre	Poutre isostatique	Poutre hyperstatique
Portée L	L = 2,00 m	Lmax = 5,00 m
Hauteur min (L/15 ou Lmax/15)	L/15 = 0,13 m	Lmax/15 = 0,33 m
Hauteur max (L/10 ou Lmax/10)	L/10 = 0,20 m	Lmax/10 = 0,50 m
Hauteur retenue h	20 cm	40 cm (calculé : 41,7 cm)
Largeur b = h/2 (min. 15 cm)	11 cm → 20 cm	22 cm → 25 cm
Section adoptée	20 × 20 cm	25 × 40 cm

Le prédimensionnement a conduit à une section de 25 × 40 cm. Toutefois, une section de 20 × 60 cm a été retenue dans le modèle afin d'améliorer la rigidité des poutres et de mieux répondre aux exigences de calcul. Cette hypothèse a ensuite été validée sous Robot Structural Analysis par vérification des états limites.

DESCENTE DE CHARGES

La descente de charges consiste à évaluer de manière cumulative les efforts transmis par les planchers, les murs et les poteaux jusqu'aux fondations. Elle est menée pour le poteau le plus chargé de la structure, en intégrant les charges permanentes (G) et d'exploitation (Q) propres à chaque niveau.

- Cheminement des charges

Le transfert des charges suit la chaîne structurelle suivante :

Dalles : reprise des charges surfaciques (poids propre, revêtements, exploitation)

Poutres : reprise des charges linéaires issues des dalles

Poteaux : accumulation des efforts transmis par les poutres

Fondations : transmission finale des efforts au sol

- Surface d'influence retenue

S = 4,58 m × 3,68 m = 16,85 m²

- Terrasse inaccessible

Élément	Ép. (m)	γ (kN/m³)	g (kN/m²)	G (kN)
Protection gravillon roulé	0,05	18	0,9	15,17
Étanchéité multicouche	0,03	6	0,18	3,03
Forme de pente béton maigre	0,08	20	1,6	26,97
Faux plafond BA13			0,15	2,53
Dalle corps creux (16+4)	0,2		2,85	48,04
Poids propre poutres				16,52
Total G (g = 5,68 kN/m²)			5,68	112,25
Charge d'exploitation Q (terrasse inaccessible)			1,5	25,28
Nu = 1,35 G + 1,5 Q				189,46 kN

- Penthouse (R+5) et étages courants (R+1 à R+4)

Les étages courants présentent les mêmes charges que le Penthouse, avec une charge d'exploitation de logement résidentiel de 2,50 kN/m² (contre 1,50 kN/m² en terrasse inaccessible).

Élément	Ép. (m)	γ (kN/m³)	g (kN/m²)	G (kN)
Carrelage scellé + mortier de pose	0,02	20	0,40	6,74
Chape de mortier de ciment	0,07	20	1,40	23,60
Faux plafond BA13			0,15	2,53
Dalle corps creux (16+4)	0,20		2,85	48,04
Poids propre poutres				24,78

Élément	Ép. (m)	γ (kN/m³)	g (kN/m²)	G (kN)
Total G (g = 6,06 kN/m²)			6,06	105,68
Charge d'exploitation Q (logement)			2,50	42,14
Nu (par niveau) = 1,35 G + 1,5 Q				205,87 kN
Nu cumulé R+1 à R+4 (× 4 niveaux)				823,49 kN

- Murs en agglos de 15 cm

Composition : agglos 15 cm (1,80 kN/m²) + enduit extérieur (0,33 kN/m²) + enduit intérieur (0,33 kN/m²) = 2,46 kN/m². Sur une hauteur totale de 11,648 m, la charge linéaire est transmise au poteau sur sa longueur tributaire.

G mur = 2,46 × 11,648 × L_trib → Nu mur = 1,35 × G mur = 94,35 kN

Récapitulatif : Descente globale vers les fondations

Source de charge	Nu partiel (kN)	Nu cumulé (kN)
Terrasse inaccessible	189,46	189,46
Penthouse (R+5)	205,87	398,54
Étages courants R+1 à R+4 (4 niveaux)	823,49	1 222,03
Murs en agglos 15 cm (h = 11,65 m)	94,35	1 316,38
Poids propre poteau RDC (0,20×0,20×5,70 m)	5,70	
EFFORT TOTAL Nu — niveau fondations		1 325,28 kN
Effort de service Nser = G + Q		897,66 kN

Nu total = 189,46 + 205,87 + 823,49 + 94,35 + 5,70 = 1 325,28 kN

N service = G + Q = 897,66 kN

PRÉDIMENSIONNEMENT DES POTEAUX

Le prédimensionnement des poteaux est réalisé conformément aux règles du BAEL 91 révisé 99 (Art. B.8.4), en tenant compte du phénomène de flambement. Le calcul est conduit pour le poteau le plus sollicité, reprenant l'effort ultime Nu = 1 325,28 kN issu de la descente de charges.

- Formules de calcul
- Élancement

$\lambda = (2\sqrt{3} \times Lf) / a = (2 \times 1{,}732 \times 2{,}24) / a$

Pour une section initiale a = 0,20 m (hypothèse de départ), on obtient $\lambda = 35$, traduisant un poteau modérément élancé ($\lambda < 50$).

1.2 Coefficient de flambement (BAEL 91 Art. B.8.2.1)

Si $\lambda < 50$: $\alpha = 0{,}85 / [1 + 0{,}2 \times (\lambda/35)^2] = 0{,}7083$

1.3 Section réduite nécessaire

$Br = (0{,}9 \times \gamma b \times Nu) / (\alpha \times fc28) = (0{,}9 \times 1{,}5 \times 1{,}3253) / (0{,}7083 \times 25) = 0{,}1010\ m^2$

- Dimensions des sections

Section carrée : $a = \sqrt{Br} + 0{,}02 = 0{,}3379\ m \approx 35\ cm$

Section rectangulaire : $a = Lf\sqrt{12} / \lambda = 22{,}17\ cm$; $b = (Br/(a–2)) + 2 = 52{,}09\ cm \rightarrow 55 \times 25\ cm$

Section circulaire : $d = \sqrt{(4Br / \pi)} + 0{,}02 = 0{,}3788\ m \rightarrow Ø\ 40\ cm$

- Tableau de synthèse

Paramètre	Valeur calculée	Unité
Hauteur d'étage L_0	3,2	m
Longueur de flambement $Lf = 0{,}7 \times L_0$	2,24	m
Résistance béton fc28	25	MPa
Coeff. sécurité béton γb	1,5	
Effort ultime Nu	1,3253	MN
Élancement $\lambda = 2\sqrt{3} \times Lf / a$	35	
Coefficient de flambement α ($\lambda < 50$)	0,7083	
Section réduite $Br = 0{,}9 \times \gamma b \times Nu / (\alpha \times fc28)$	0,101	m^2

Côté section carrée a = √Br + 2 cm	33,79 → 35 cm	cm
Section rectangulaire a × b	22,17 × 52,09 → 55 × 25 cm	cm
Section circulaire d = √(4Br/π) + 2	37,88 → Ø 40 cm	cm
SECTIONS RETENUES	55×25	cm

La section rectangulaire de 55 × 25 cm a été adoptée. La section a été intégrée dans la maquette Revit 2025 et validées sous Robot Structural Analysis.

L'ensemble des calculs a été vérifié et validé par modélisation numérique sous Autodesk Robot Structural Analysis Professional, avec exportation du modèle analytique depuis Autodesk Revit 2025 (lien Revit → Robot). Les résultats présentés ici constituent les valeurs de prédimensionnement ; les vérifications finales aux ELU et ELS figurent dans les notes de calcul Robot

NOTE DE CALCUL DES POUTRES EN BÉTON ARMÉ

Dimensionnement selon le BAEL 91 modifié 99

1. Objet de la note de calcul

La présente note de calcul a pour objet le dimensionnement d'une poutre en béton armé conformément aux prescriptions du règlement **BAEL 91 modifié 99**.

Les calculs réalisés permettent de :

- vérifier la résistance de la poutre sous les sollicitations de flexion et de cisaillement ;
- déterminer les sections d'armatures longitudinales nécessaires ;
- dimensionner les armatures transversales assurant la reprise des efforts tranchants ;
- vérifier les contraintes dans le béton et les armatures à l'État Limite de Service (ELS) ;
- contrôler les déformations et les flèches admissibles.

L'ensemble des vérifications est effectué suivant :

- **l'État Limite Ultime (ELU)** pour la sécurité structurale ;
- **l'État Limite de Service (ELS)** pour le comportement en exploitation.

2. Données générales

2.1 Informations générales

Désignation	Valeur
Règlement utilisé	BAEL 91 modifié 99
Niveau étudié	0,00 m
Type d'élément	Poutre en béton armé
Nombre d'éléments identiques	1
Milieu d'exposition	Non agressif
Fissuration	Peu préjudiciable
Tenue au feu	3/2 h
Calcul sismique	Non

3. Caractéristiques des matériaux

3.1 Béton

Caractéristique	Valeur
Classe du béton	C25/30
Résistance caractéristique	$f_{c28} = 25MPa$
Masse volumique	2407,31 kg/m³

La résistance de calcul du béton à l'ELU est :

$$f_{bu} = 0{,}85\frac{f_{c28}}{\theta\gamma_b}$$

Avec :

$$\theta = 1$$
$$\gamma_b = 1{,}5$$

Donc :

$$f_{bu} = 0{,}85 \times \frac{25}{1 \times 1{,}5}$$
$$\boxed{f_{bu} = 14{,}17MPa}$$

3.2 Acier

Les armatures utilisées sont de type :

Type d'acier	**Valeur**
Armatures longitudinales	HA500
Armatures transversales	HA500
Armatures additionnelles	HA500
Limite élastique	$f_e = 500MPa$

La contrainte de calcul de l'acier est :

$$f_{ed} = \frac{f_e}{\gamma_s}$$

avec :

$$\gamma_s = 1{,}15$$

Donc :

$$f_{ed} = \frac{500}{1{,}15}$$

$$\boxed{f_{ed} = 434{,}78MPa}$$

4. Caractéristiques géométriques

La poutre étudiée possède une section constante :

$$\boxed{b \times h = 20 \times 60cm}$$

soit :

$$b = 20cm$$
$$h = 60cm$$

4.1 Hauteur utile

La hauteur utile est déterminée par :

$$d = h - c - \frac{\phi}{2}$$

Avec :

- enrobage : $c = 3{,}3cm$
- diamètre moyen des armatures : $\phi = 16mm$

Donc :

$$d = 60 - 3{,}3 - \frac{1{,}6}{2}$$

$$\boxed{d = 55{,}9cm}$$

5. Description des travées étudiées

La poutre est composée de six travées.

Travée	Longueur (m)	Section
P1	5,05	20×60 cm
P2	3,29	20×60 cm
P3	0,46	20×60 cm
P4	0,49	20×60 cm
P5	3,29	20×60 cm
P6	5,05	20×60 cm

6. Hypothèses de calcul

Les hypothèses retenues sont :

- calcul suivant BAEL 91 modifié 99 ;
- poutre coulée en place ;
- absence d'action sismique ;
- fissuration peu préjudiciable ;
- enrobage des armatures :

$$c = 3cm$$

7. Combinaisons de calcul

Les combinaisons utilisées sont celles définies par le BAEL.

7.1 Combinaison ELU

La combinaison fondamentale est :

$$M_u = 1{,}35M_G + 1{,}5M_Q$$

Les efforts obtenus sont utilisés pour le dimensionnement des armatures.

7.2 Combinaison ELS

La combinaison de service est :

$$M_s = M_G + M_Q$$

Elle permet la vérification :

- des contraintes du béton ;
- des contraintes de l'acier ;
- des flèches.

8. Résultats des sollicitations ELU

Les sollicitations maximales obtenues sont :

Travée	Moment positif max (kN.m)	Moment négatif max (kN.m)	Effort tranchant max (kN)
P1	84,74	-69,03	118,09
P2	37,88	-35,86	85,46
P3	7,34	-41,82	86,84
P4	2,01	-37,99	75,60
P5	26,58	-36,82	73,14
P6	73,85	-69,89	117,58

Les moments maximaux sont obtenus :

- en travée P1 :

$$\boxed{M_u = 84{,}74kN.m}$$

- en appui P6 :

$$\boxed{M_u = -69{,}89kN.m}$$

Ces sections sont donc les plus sollicitées.

9. Résultats des sollicitations ELS

Travée	Moment positif (kN.m)	Moment négatif (kN.m)	Effort tranchant (kN)
P1	68,29	-57,62	96,36
P2	30,24	-30,59	69,96
P3	5,44	-34,45	70,58
P4	1,49	-31,45	61,68
P5	21,54	-30,95	60,15
P6	59,89	-57,81	95,70

Ces valeurs seront utilisées pour les vérifications de contraintes.

10. Sections théoriques d'acier obtenues

Les sections nécessaires calculées par le logiciel sont :

Travée	Acier inférieur travée (cm²)	Acier supérieur appui gauche (cm²)	Acier supérieur appui droit (cm²)
P1	3,76	1,53	3,04
P2	1,63	1,54	0,15
P3	0,31	1,80	1,80
P4	0,08	1,63	1,61
P5	1,14	0,18	1,58
P6	3,25	3,08	1,40

Les besoins maximaux concernent :

$$\boxed{P1 : A_s = 3{,}76cm^2}$$

et

$$\boxed{P6 : A_s = 3{,}25cm^2}$$

DIMENSIONNEMENT DES ARMATURES ET VÉRIFICATIONS ELU

11. Dimensionnement des armatures longitudinales en flexion ELU

Le dimensionnement en flexion simple est effectué conformément au **BAEL 91 modifié 99**.

La poutre est considérée comme une section rectangulaire soumise à un moment fléchissant.

11.1 Calcul de la résistance du béton à l'ELU

La contrainte de calcul du béton est :

$$f_{bu} = 0{,}85\frac{f_{c28}}{\theta\gamma_b}$$

Avec :

$$f_{c28} = 25MPa$$
$$\gamma_b = 1{,}5$$
$$\theta = 1$$

Donc :

$$f_{bu} = 0{,}85 \times \frac{25}{1{,}5}$$

$$\boxed{f_{bu} = 14{,}17MPa}$$

11.2 Calcul du moment réduit

Le moment réduit est donné par :

$$\mu_u = \frac{M_u}{bd^2 f_{bu}}$$

Avec :

- M_u: moment ultime en N.mm ;
- b: largeur de la poutre ;
- d: hauteur utile ;
- f_{bu}: contrainte de calcul du béton.

Application à la travée la plus sollicitée P1

Données :

$$M_u = 84{,}74kN.m$$

Conversion :

$$M_u = 84{,}74 \times 10^6 N.mm$$

Dimensions :

$$b = 200mm$$
$$d = 559mm$$

Donc :

$$\mu_u = \frac{84{,}74 \times 10^6}{200 \times 559^2 \times 14{,}17}$$

D'où :

$$\boxed{\mu_u = 0{,}096}$$

11.3 Détermination du coefficient de pivot

Le coefficient de position de la fibre neutre est :

$$\alpha = 1{,}25\left(1 - \sqrt{1 - 2\mu_u}\right)$$

Application :

$$\alpha = 1{,}25\left(1 - \sqrt{1 - 2(0{,}096)}\right)$$

Donc :

$$\boxed{\alpha = 0{,}126}$$

11.4 Calcul du bras de levier

Le bras de levier interne est :

$$z = d(1{,}-04\alpha)$$

Application :

$$z = 559(1{,}-{,}04 \times 0126)$$

Donc :

$$\boxed{z = 530{,}8mm}$$

soit :

$$z = 53{,}08cm$$

11.5 Calcul de la section d'acier nécessaire

La section d'acier tendue est :

$$A_s = \frac{M_u}{z f_{ed}}$$

avec :

$$f_{ed} = 434{,}78MPa$$

Donc :

$$A_s = \frac{84{,}74 \times 10^6}{530{,}8 \times 434{,}78}$$

Résultat :

$$\boxed{A_s = 3{,}67cm^2}$$

11.6 Vérification de l'acier minimum

Le BAEL impose :

$$A_{s,min} = 0{,}23\frac{bdf_{tj}}{f_e}$$

avec :

$$f_{tj} = 0{,}6 + 0{,}06f_{c2}$$

Donc :

$$f_{tj} = 0{,}6 + 0{,}06(25)$$
$$f_{tj} = 2{,}1MPa$$

Ainsi :

$$A_{s,min} = 0{,}23\frac{200 \times 559 \times 2{,}1}{500}$$
$$\boxed{A_{s,min} = 1{,}08cm^2}$$

Comparaison :

$$A_s = 3{,}67cm^2 > A_{s,min}$$

La condition est donc vérifiée.

11.7 Choix du ferraillage longitudinal

La section théorique demandée :

$$A_s = 3{,}76cm^2$$

Le ferraillage adopté est :

$$\boxed{2HA16 + 2HA16}$$

Section réelle :

$$A_s = 4 \times \frac{\pi 16^2}{4}$$

$$A_s = 8{,}04cm^2$$

Vérification :

$$8{,}04 > 3{,}76$$

Ferraillage satisfaisant

12. Dimensionnement au cisaillement

La vérification du cisaillement est réalisée à partir de la contrainte tangente :

$$\tau_u = \frac{V_u}{bd}$$

12.1 Vérification de la travée la plus sollicitée

La valeur maximale de l'effort tranchant est obtenue en P6 :

$$V_u = 117{,}58kN$$

Conversion :

$$V_u = 117580N$$

Donc :

$$\tau_u = \frac{117580}{200 \times 559}$$

$$\boxed{\tau_u = 1{,}05MPa}$$

12.2 Contrainte limite du béton

Selon le BAEL :

$$\tau_{lim} = min\left(0{,}15, \frac{f_{c28}}{\gamma_b} 4MPa\right)$$

Donc :

$$\tau_{lim} = 0{,}15\frac{25}{1{,}5}$$

$$\tau_{lim} = 2{,}5MPa$$

Comparaison :

$$1{,}05 < 2{,}5$$

Donc :

$$\boxed{\text{La résistance au cisaillement est vérifiée}}$$

13. Dimensionnement des armatures transversales

Les armatures transversales sont calculées par :

$$\frac{A_t}{s} \geq \frac{V_u}{0{,}9 d f_e}$$

Avec :

$$V_u = 117{,}58kN$$
$$d = 559mm$$
$$f_e = 500MPa$$

Application :

$$\frac{A_t}{s} \geq \frac{117580}{0{,}9 \times 559 \times 500}$$
$$\frac{A_t}{s} \geq 0{,}47cm^2/m$$

Le ferraillage transversal adopté est :

$$\boxed{\text{Cadres HA6}}$$

avec un espacement variable suivant les zones :

- zones d'appui : espacement réduit ;
- zones de travée : espacement augmenté.

Ce choix respecte les dispositions constructives du BAEL.

14. Vérification des bielles comprimées

La contrainte dans la bielle comprimée est calculée par :

$$\sigma_{bc} = \frac{V_u}{b_0 a}$$

La contrainte maximale admissible est :

$$\boxed{\sigma_{bc,adm} = 13{,}33MPa}$$

Résultats de vérification

Élément	**Effort tranchant V_u(kN)**	**σbc calculée (MPa)**	**σbc limite (MPa)**	**Vérification**
P1 appui gauche	92,87	4,71	13,33	OK
P1 appui droit	118,09	2,32	13,33	OK
P2 appui gauche	85,46	1,68	13,33	OK
P2 appui droit	48,26	4,39	13,33	OK
P3 appui droit	86,84	1,70	13,33	OK
P4 appui gauche	75,60	1,48	13,33	OK
P5 appui droit	73,14	1,43	13,33	OK
P6 appui gauche	117,58	2,31	13,33	OK
P6 appui droit	91,24	4,63	13,33	OK

Toutes les vérifications des bielles comprimées sont satisfaites.

Les vérifications effectuées montrent que :

- les sections d'acier longitudinales calculées sont suffisantes ;
- la résistance en flexion est vérifiée ;
- la résistance au cisaillement est assurée ;

- les contraintes dans les bielles comprimées restent inférieures aux valeurs admissibles ;
- les armatures transversales HA6 assurent la stabilité de la poutre.

La poutre satisfait donc les exigences de sécurité à l'État Limite Ultime.

VÉRIFICATIONS À L'ÉTAT LIMITE DE SERVICE (ELS), FERRAILLAGE FINAL ET QUANTITATIF

15. Vérification des contraintes à l'ELS

Les vérifications à l'État Limite de Service permettent de contrôler que les contraintes développées dans le béton et les armatures restent compatibles avec les limites réglementaires du **BAEL 91 modifié 99**.

Les vérifications portent sur :

- la compression du béton ;
- la traction des armatures ;
- les déformations ;
- les flèches.

15.1 Vérification de la contrainte de compression du béton

À l'ELS, la contrainte maximale dans le béton comprimé est donnée par :

$$\sigma_{bc} = \frac{M_{ser}}{I} \times y$$

Avec :

- M_{ser}: moment fléchissant de service ;
- I: moment d'inertie de la section homogénéisée ;
- y: distance de la fibre comprimée à l'axe neutre.

La contrainte admissible selon le BAEL est :

$$\sigma_{bc,adm} = 0{,}6 f_{c2}$$

Donc :

$$\sigma_{bc,adm} = 0{,}6 \times 25$$

$$\boxed{\sigma_{bc,adm} = 15MPa}$$

15.2 Résultats des contraintes béton à l'ELS

Les valeurs maximales obtenues par les calculs sont regroupées ci-dessous :

Travée	Moment ELS maximal (kN.m)	Contrainte béton maximale σbc (MPa)	Contrainte admissible (MPa)	Vérification
P1	68,29	7,45	15	OK
P2	30,24	3,97	15	OK
P3	5,44	3,96	15	OK
P4	1,49	3,68	15	OK
P5	21,54	4,02	15	OK

Travée	Moment ELS maximal (kN.m)	Contrainte béton maximale σbc (MPa)	Contrainte admissible (MPa)	Vérification
P6	59,89	7,47	15	OK

La valeur maximale est obtenue au niveau de P6 :

$$\sigma_{bc,max} = 7{,}47MPa$$

Vérification :

$$7{,}47 < 15$$

Donc :

La compression du beton est verifiee a l'ELS

16. Vérification des contraintes dans les armatures longitudinales

La contrainte dans l'acier tendu est calculée par :

$$\sigma_s = n\frac{M_s}{I}y_s$$

avec :

$$n = \frac{E_s}{E_b}$$

Le coefficient d'équivalence utilisé est :

$$\boxed{n = 15}$$

Pour une fissuration peu préjudiciable, la limite réglementaire est :

$$\sigma_{s,adm} = f_e$$

soit :

$$\boxed{\sigma_{s,adm} = 500MPa}$$

16.1 Résultats des contraintes acier

Travée	Contrainte acier maximale σs (MPa)	Limite BAEL (MPa)	Vérification
P1	294,90	500	OK
P2	156,74	500	OK
P3	135,74	500	OK
P4	125,97	500	OK
P5	158,61	500	OK
P6	295,92	500	OK

La valeur maximale est :

$$\sigma_{s,max} = 295{,}92MPa$$

Donc :

$$295{,}92 < 500$$

$$\boxed{\text{La contrainte dans les aciers est vérifiée}}$$

17. Vérification des déformations et des flèches

La vérification des flèches est effectuée conformément au BAEL.

La flèche totale prise en compte est :

$$\Delta F_t = F_{gv} + F_{pi} - F_{ji}$$

Elle doit respecter :

$$\Delta F_t \leq F_{adm}$$

17.1 Résultats des flèches

Travée	Fgi (cm)	Fgv (cm)	Fji (cm)	Fpi (cm)	ΔFt (cm)	Fadm (cm)	Vérification
P1	0,1	0,2	0,0	0,2	0,3	1,0	OK
P2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	OK
P3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	OK
P4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	OK
P5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	OK
P6	0,1	0,2	0,0	0,2	0,3	1,0	OK

La flèche maximale est :

$$\Delta F_{max} = 0{,}3cm$$

La limite maximale est :

$$F_{adm} = 1cm$$

Donc :

$$0{,}3 < 1$$

Les conditions de flèche sont respectées

18. Conclusion générale

La présente note de calcul réalisée conformément au **BAEL 91 modifié 99** montre que la poutre en béton armé étudiée de section :

$$\boxed{20 \times 60cm}$$

satisfait l'ensemble des exigences réglementaires.

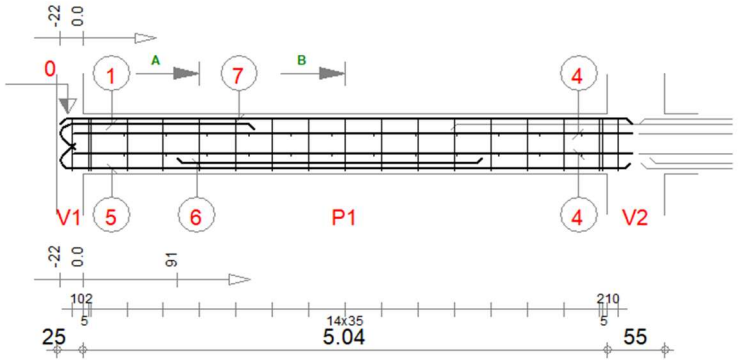
Les vérifications effectuées montrent que :

- la résistance en flexion à l'ELU est assurée ;
- la résistance au cisaillement est vérifiée ;
- les contraintes dans les bielles comprimées restent inférieures aux valeurs admissibles ;
- les contraintes du béton à l'ELS sont satisfaisantes ;
- les contraintes dans les armatures restent inférieures aux limites réglementaires ;
- les flèches calculées respectent les valeurs admissibles.

Le ferraillage adopté constitué principalement d'armatures **HA14 et HA16 longitudinales**, complété par des cadres **HA6**, garantit la stabilité, la sécurité et la durabilité de l'ouvrage.

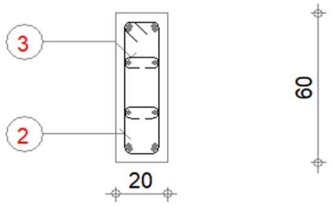
La poutre peut être exécutée conformément aux plans de ferraillage et aux dispositions constructives du BAEL 91 modifié 99.

Ferraillage de Poutre

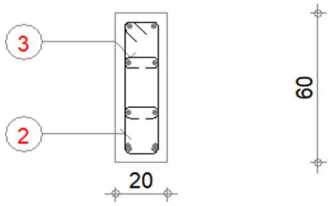


Pos.	Armature		Code	Forme
1	2HA 16	l=2.13	00	
2	19HA 6	l=1.47	31	
3	2*12HA 6	l=29	00	
4	2*2HA 14	l=5.38	00	
5	2HA 16	l=5.75	00	
6	2HA 16	l=2.94	00	
7	2HA 14	l=5.50	00	

A-A



B-B



Tél. Fax

Tenue au feu 3/2h | Fissuration peu préjudiciable | Reprise de bétonnage : Non

R PRO

20230311_MEMOIRE_S10

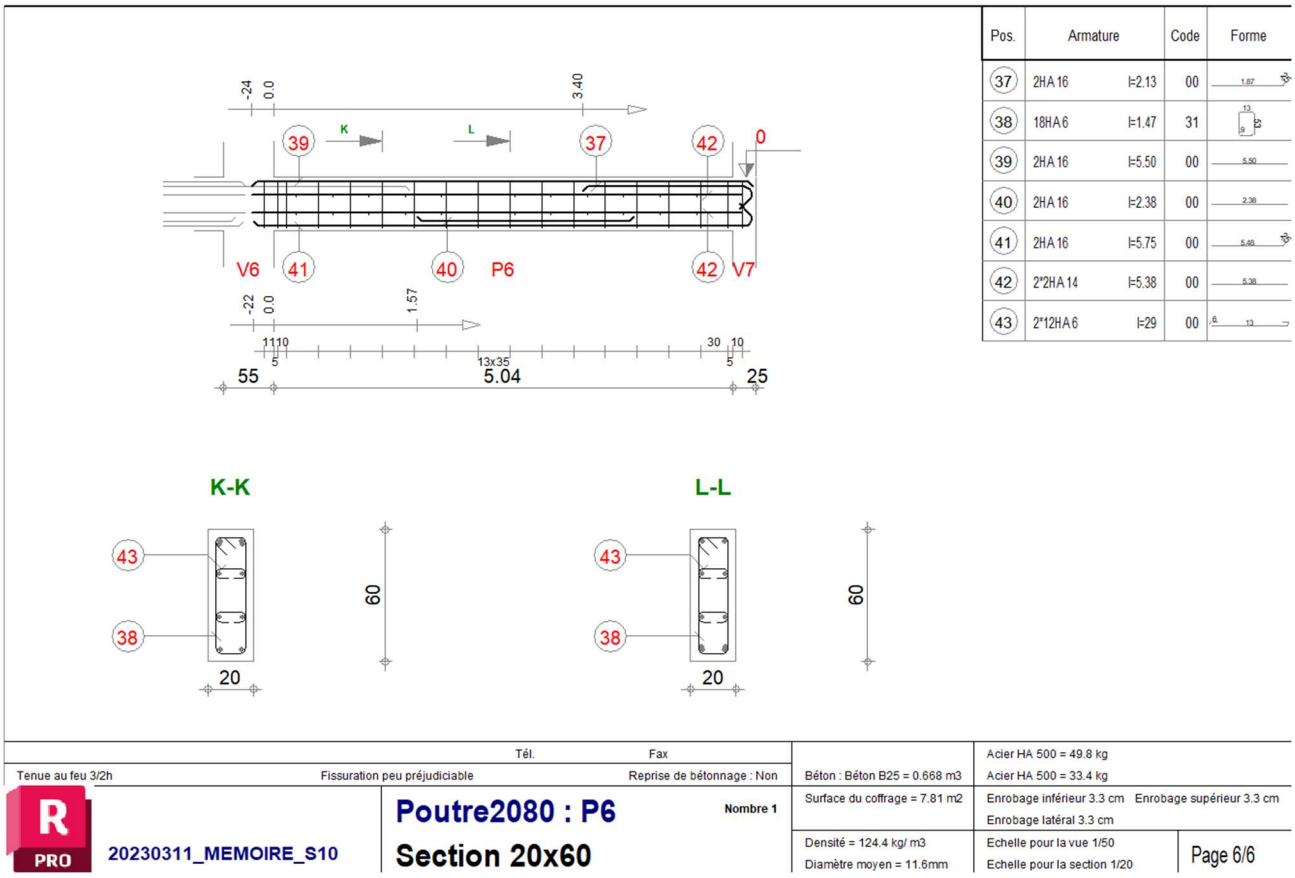
Poutre2080 : P1 Nombre 1

Section 20x60

Béton : Béton B25 = 0.668 m3
Surface du coffrage = 7.81 m2
Densité = 121.4 kg/ m3
Diamètre moyen = 11.4mm

Acier HA 500 = 47.4 kg
Acier HA 500 = 33.7 kg
Enrobage inférieur 3.3 cm Enrobage supérieur 3.3 cm
Enrobage latéral 3.3 cm
Echelle pour la vue 1/50
Echelle pour la section 1/20

Page 1/6



Pos.	Armature		Code	Forme
37	2HA 16	l=2.13	00	
38	18HA 6	l=1.47	31	
39	2HA 16	l=5.50	00	
40	2HA 16	l=2.38	00	
41	2HA 16	l=5.75	00	
42	2*2HA 14	l=5.38	00	
43	2*12HA 6	l=29	00	

Tél. Fax

Tenue au feu 3/2h | Fissuration peu préjudiciable | Reprise de bétonnage : Non

Béton : Béton B25 = 0.668 m3 | Acier HA 500 = 49.8 kg | Acier HA 500 = 33.4 kg

Surface du coffrage = 7.81 m2 | Enrobage inférieur 3.3 cm | Enrobage supérieur 3.3 cm | Enrobage latéral 3.3 cm

Densité = 124.4 kg/ m3 | Diamètre moyen = 11.6mm | Echelle pour la vue 1/50 | Echelle pour la section 1/20

R PRO

20230311_MEMOIRE_S10

Poutre2080 : P6 Nombre 1

Section 20x60

Page 6/6

DIMENSIONNEMENT DE POTEAU

NOTE DE CALCUL DU POTEAU P245

Objet de la note de calcul

La présente note de calcul a pour objet le dimensionnement du poteau P245 en béton armé conformément au règlement BAEL 91 modifié 99. Les calculs permettent de vérifier la résistance du poteau soumis aux efforts de compression, de contrôler sa stabilité vis-à-vis du flambement et de déterminer les armatures longitudinales et transversales nécessaires.

L'ensemble des vérifications est réalisé à l'État Limite Ultime (ELU) et à l'État Limite de Service (ELS).

Données générales

Niveau étudié

- Niveau de l'étage : ±0,00 m
- Milieu d'exposition : Non agressif
- Fissuration : Peu préjudiciable
- Tenue au feu : 1 h 30 min (R90)

Caractéristiques des matériaux

Désignation	Valeur
Béton	C25/30
Résistance du béton f_{c28}	25 MPa
Masse volumique	2407,31 kg/m³
Acier longitudinal	HA 500
Acier transversal	HA 500
Limite élastique des aciers f_e	500 MPa

Caractéristiques géométriques

Le poteau étudié présente une section rectangulaire.

- Largeur : 35 cm
- Hauteur : 55 cm
- Épaisseur de la dalle : 20 cm
- Hauteur sous dalle : 3,10 m
- Hauteur sous poutre : 2,70 m
- Enrobage nominal : 3 cm

Hypothèses de calcul

Le dimensionnement est réalisé conformément au BAEL 91 modifié 99.

Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- Calcul non sismique ;
- Compression simple ;
- Prise en compte de l'élancement ;
- Poteau coulé en place ;
- Vérification forfaitaire de la tenue au feu ;
- Cadres arrêtés sous poutre ;
- Plus de 50 % des charges appliquées avant 90 jours.

Vérification de la stabilité

L'analyse du flambement permet de vérifier que le poteau satisfait aux exigences de stabilité imposées par le BAEL.

Calcul de l'élancement

L'élancement est déterminé par la relation générale :

$$\lambda = \frac{K\, L_u}{i}$$

où :

- $L_u$est la longueur libre du poteau ;
- Kest le coefficient de flambement ;
- $i$est le rayon de giration de la section.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Direction	L_u(m)	K	λ
Y	3,30	1,00	20,78
Z	3,30	1,00	32,66

L'élancement maximal est donné par :

$$\lambda = \max(\lambda_y; \lambda_z)$$

Application numérique :

$$\lambda = \max(20,78; 32,66) = 32,66$$

Le règlement BAEL impose :

$$\lambda < 50$$

Cette condition est vérifiée. Le poteau est donc conforme vis-à-vis du flambement.

Calcul du coefficient réducteur

Le coefficient de réduction dû à l'élancement est calculé par :

$$\alpha = \frac{0,85}{1 + 0,2\left(\frac{\lambda}{35}\right)^2}$$

Application numérique :

$$\alpha = \frac{0{,}85}{1 + 0{,}2\left(\frac{32{,}66}{35}\right)^2} = 0{,}66$$

Cette valeur est utilisée pour le calcul de la résistance axiale ultime.

Vérification de la résistance

Section résistante

La section résistante du béton est :

$$B_r = 0{,}17\ m^2$$

La section des armatures longitudinales est :

$$A_s = 24{,}13\ cm^2$$

Résistance axiale ultime

Selon le BAEL 91 modifié 99, la résistance axiale ultime est donnée par :

$$N_{u,\text{lim}} = \alpha\left[\frac{B_r\, f_{c28}}{0{,}9\,\gamma_b} + A_s\frac{f_e}{\gamma_s}\right]$$

avec :

- $\gamma_b = 1{,}50$
- $\gamma_s = 1{,}15$

Application numérique :

$$N_{u,\text{lim}} = 0{,}66\left[\frac{0{,}17 \times 25}{0{,}9 \times 1{,}50}, +2413 \times \frac{500}{1{,}15}\right] = 2821{,}90\ kN$$

Les efforts appliqués au poteau sont résumés ci-dessous.

Combinaison	Nature	Effort normal (kN)
COMB1	ELU	1911,20
COMB2	ELS	1497,78

Le coefficient global de sécurité est obtenu par :

$$\frac{R_d}{S_d} = \frac{N_{u,\lim}}{N_u}$$

Application numérique :

$$\frac{R_d}{S_d} = \frac{2821,90}{1911,20} = 1,48$$

Le coefficient étant supérieur à 1, la résistance du poteau est conforme aux exigences du BAEL.

Dimensionnement des armatures

Le dimensionnement conduit au ferraillage suivant.

Armatures longitudinales

- 12 HA16
- Section d'acier :

$$A_s = 24,13\ cm^2$$

Armatures transversales

Le confinement est assuré par :

- 15 cadres HA6 de longueur développée 1,69 m ;
- 15 épingles HA6 de longueur 0,64 m ;

- 45 épingles HA6 de longueur 0,44 m.

Ces armatures assurent le maintien des barres longitudinales, le confinement du béton et la résistance aux efforts transversaux conformément aux prescriptions du BAEL.

Quantité totale d'acier

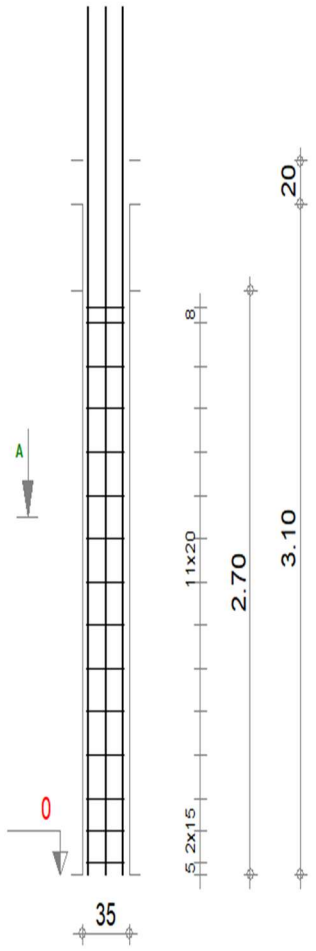
- Poids total : 88,05 kg
- Densité moyenne : 169,40 kg/m³
- Diamètre moyen : 10,7 mm

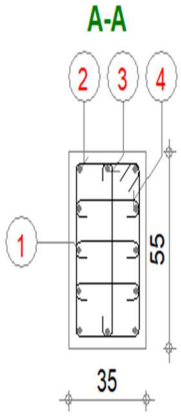
Conclusion

Les vérifications selon le BAEL 91 modifié 99 montrent que le poteau P245 présente une résistance suffisante en compression. L'élancement maximal de 32,66 reste inférieur à la limite réglementaire de 50, garantissant sa stabilité au flambement. La résistance ultime calculée (2821,90 kN) étant supérieure à l'effort de calcul (1911,20 kN), le coefficient de sécurité obtenu (1,48) respecte les exigences. Le ferraillage retenu (12 HA16 avec cadres et épingles en HA6) assure un bon confinement du béton et une stabilité satisfaisante des armatures. Le dimensionnement adopté peut donc être retenu pour l'exécution du poteau P245.

Ferraillage de Poteau

Pos.	Armature		Code	Forme
1	12HA16	l=4.00	00	4.00
2	15HA6	l=1.69	31	29 / 9 / 45
3	15HA6	l=64	00	6 / 45
4	45HA6	l=44	00	6 / 29





Tél. Fax

R PRO

20230311_MEMOIRE_S10

Poteau245

Section 35x55

Acier HA 500 = 75.8 kg — Béton : Béton B25 = 0.52 m3

Acier HA 500 = 12.2 kg — Surface du coffrage = 4.86 m2

Enrobage 3 cm

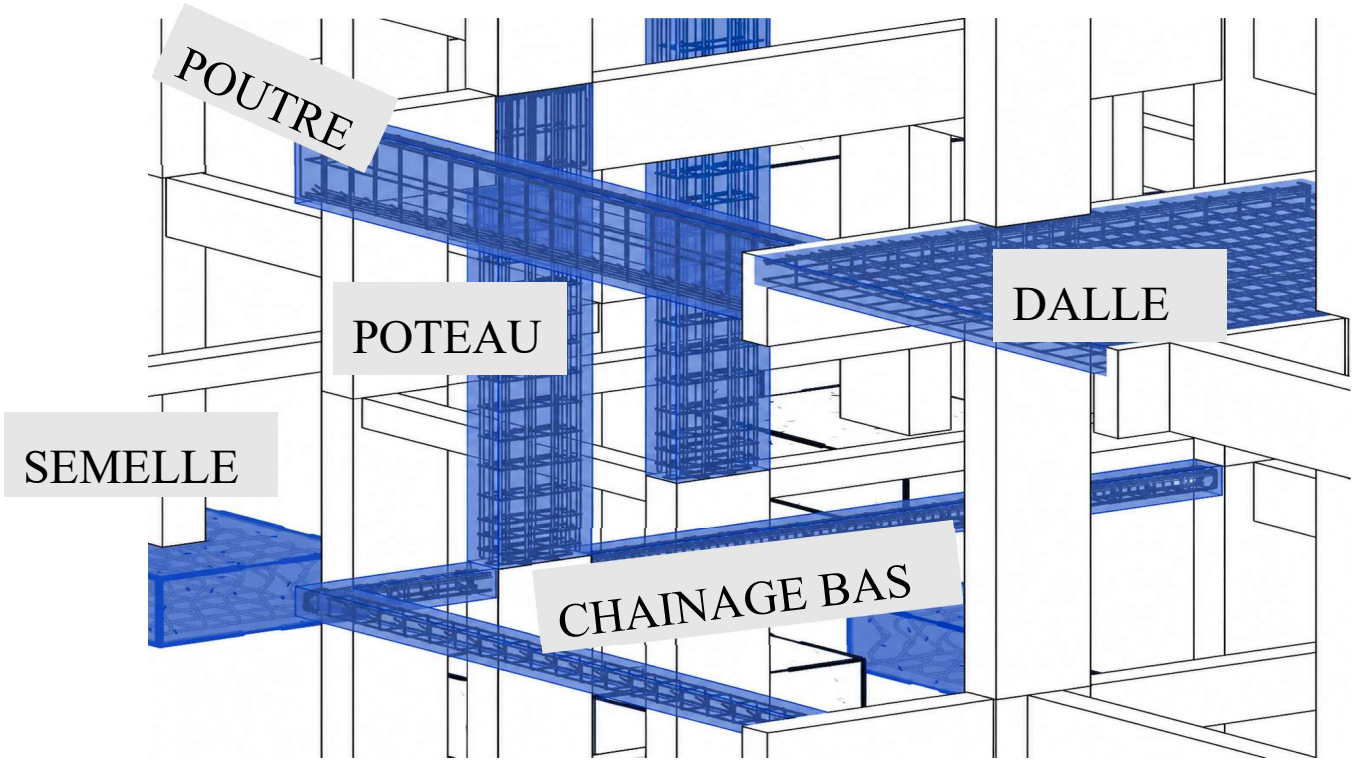
Echelle pour la vue 1/33

Echelle pour la section 1/20

Page 1/1

Annexe 3 : Modélisation BIM

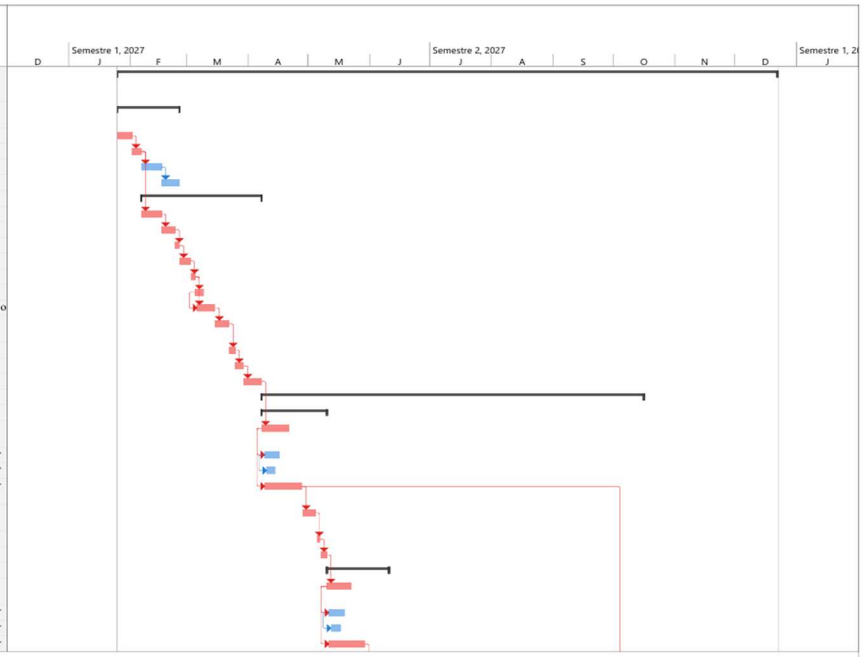
Maquette sous Revit



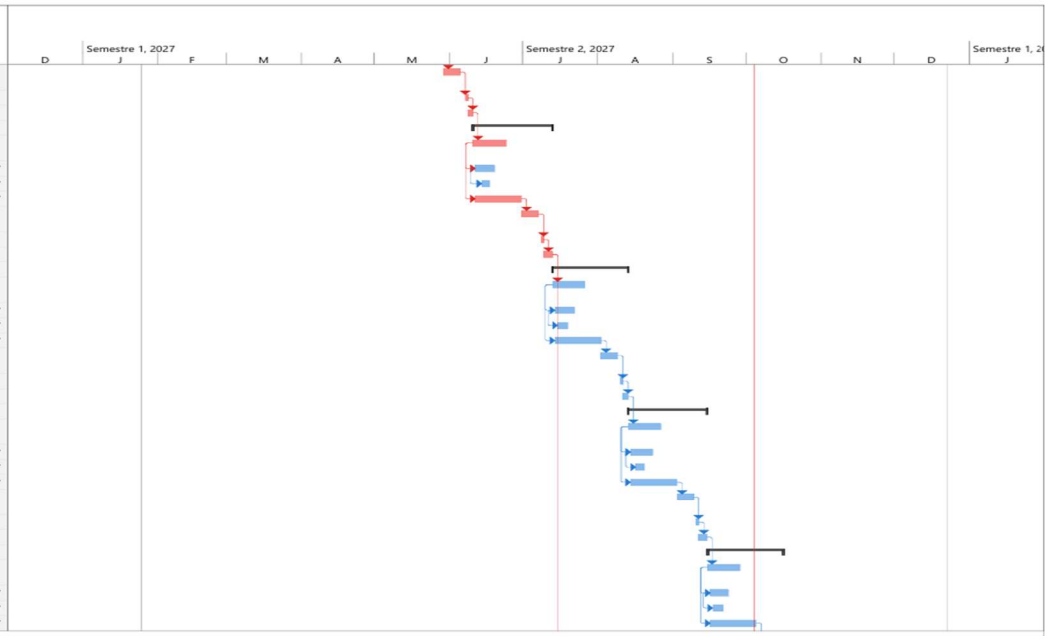
Annexe 4 : BIM 4D - Planification

Planning détaillé Microsoft Project

N°	WBS	Nom de la tâche	Durée	Prédécesseurs
1	1	***PROJET BIM 4D MÉMOIRE DE 20230311***	**249 jours**	
2	*1.1*	***INSTALLATION ET PREPARATION***	***24 jours***	
3	1.1.1	Installation de chantier	6 jours	
4	1.1.2	Implantation	4 jours	3
5	1.1.3	Études d'exécution	7 jours	4
6	1.1.4	Approvisionnement initial	7 jours	5
7	1.2	FONDATION	45 jours	
8	1.2.1	Terrassement général	7 jours	4
9	1.2.2	Fouilles en Trou	5 jours	8
10	1.2.3	Béton de propreté	2 jours	9
11	1.2.4	Ferraillage semelles	4 jours	10
12	1.2.5	Coffrage + Coulage semel	2 jours	11
13	1.2.6	Cure béton semelles	3 jours	12
14	1.2.7	Amorce des poteaux	6 jours	12;13DD+1 jo
15	1.2.8	Longrines BA (coffrage + ferraillage + coulage)	5 jours	14
16	1.2.9	Cure béton longrines	3 jours	15
17	1.2.10	Remblai compacté	3 jours	16
18	1.2.11	Dallage	7 jours	17
19	1.3	STRUCTURE	144 jours	
20	1.3.1	RDC	24 jours	
21	1.3.1.1	Coffrage + Ferraillage poteaux RDC	10 jours	18
22	1.3.1.2	Coulage poteaux RDC	6 jours	21DD+1 jour
23	1.3.1.3	Cure béton poteaux RD	3 jours	22DD+1 jour
24	1.3.1.4	Coffrage poutres + dalle RDC	14 jours	21DD+1 jour
25	1.3.1.5	Ferraillage poutres + dalle RDC	5 jours	24
26	1.3.1.6	Bétonnage dalle RDC	1 jour	25FD+1 jour
27	1.3.1.7	Cure béton dalle RDC	2 jours	26
28	1.3.2	R+1	24 jours	
29	1.3.2.1	Coffrage + Ferraillage poteaux R+1	10 jours	27
30	1.3.2.2	Coulage poteaux R+1	6 jours	29DD+1 jour
31	1.3.2.3	Cure béton poteaux R+	3 jours	30DD+1 jour
32	1.3.2.4	Coffrage poutres + dall	14 jours	29DD+1 jour

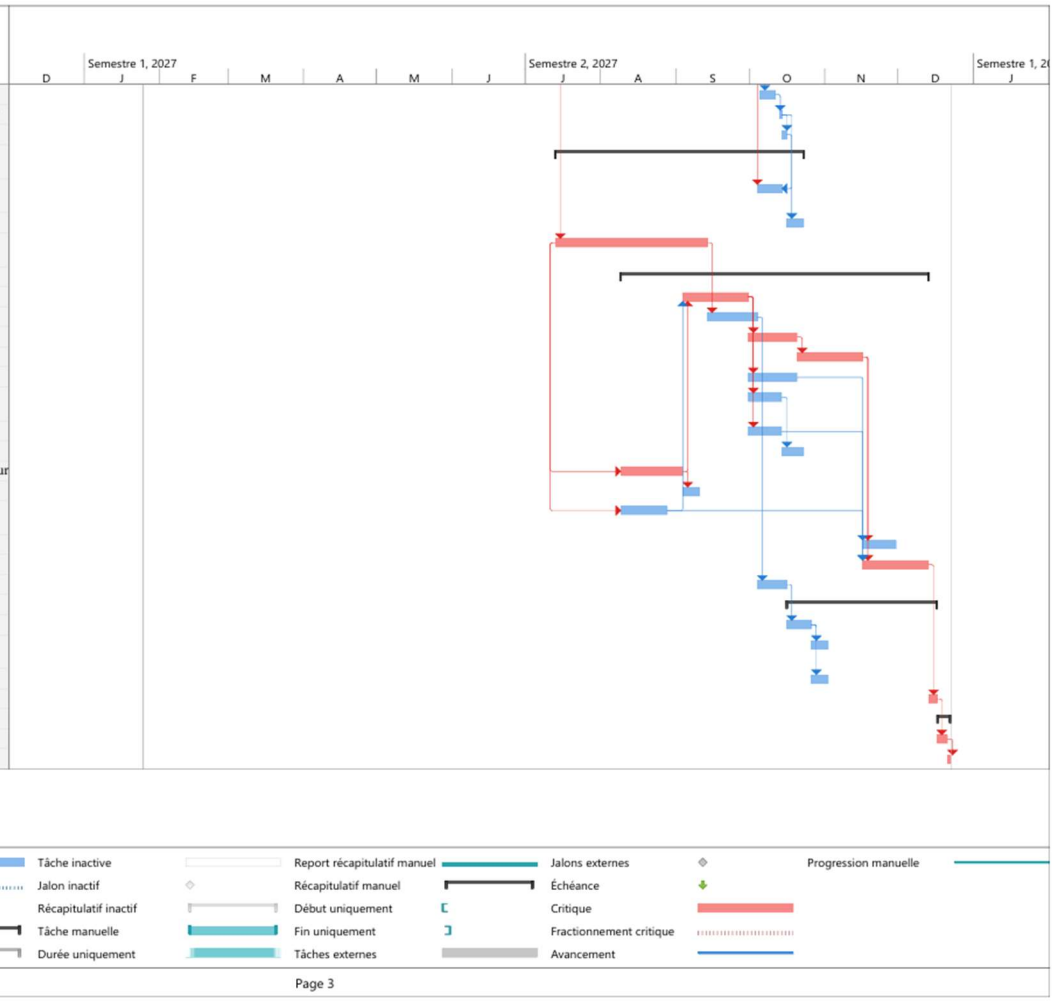


N°	WBS	Nom de la tâche	Durée	Prédécesseurs
33	1.3.2.5	Ferraillage poutres + dalle R+1	5 jours	32
34	1.3.2.6	Bétonnage dalle R+1	1 jour	33FD+1 jour
35	1.3.2.7	Cure béton dalle R+1	2 jours	34
36	1.3.3	R+2	24 jours	
37	1.3.3.1	Coffrage + Ferraillage poteaux R+2	10 jours	35
38	1.3.3.2	Coulage poteaux R+2	6 jours	37DD+1 jour
39	1.3.3.3	Cure béton poteaux R+	3 jours	38DD+1 jour
40	1.3.3.4	Coffrage poutres + dall	14 jours	37DD+1 jour
41	1.3.3.5	Ferraillage poutres + dalle R+2	5 jours	40
42	1.3.3.6	Bétonnage dalle R+2	1 jour	41FD+1 jour
43	1.3.3.7	Cure béton dalle R+2	2 jours	42
44	1.3.4	R+3	24 jours	
45	1.3.4.1	Coffrage + Ferraillage poteaux R+3	10 jours	43
46	1.3.4.2	Coulage poteaux R+3	6 jours	45DD+1 jour
47	1.3.4.3	Cure béton poteaux R+	3 jours	46DD+1 jour
48	1.3.4.4	Coffrage poutres + dall	14 jours	45DD+1 jour
49	1.3.4.5	Ferraillage poutres + dalle R+3	5 jours	48
50	1.3.4.6	Bétonnage dalle R+3	1 jour	49FD+1 jour
51	1.3.4.7	Cure béton dalle R+3	2 jours	50
52	1.3.5	R+4	24 jours	
53	1.3.5.1	Coffrage + Ferraillage poteaux R+4	10 jours	51
54	1.3.5.2	Coulage poteaux R+4	6 jours	53DD+1 jour
55	1.3.5.3	Cure béton poteaux R+	3 jours	54DD+1 jour
56	1.3.5.4	Coffrage poutres + dall	14 jours	53DD+1 jour
57	1.3.5.5	Ferraillage poutres + dalle R+4	5 jours	56
58	1.3.5.6	Bétonnage dalle R+4	1 jour	57FD+1 jour
59	1.3.5.7	Cure béton dalle R+4	2 jours	58
60	1.3.6	R+5	24 jours	
61	1.3.6.1	Coffrage + Ferraillage poteaux R+5	10 jours	59
62	1.3.6.2	Coulage poteaux R+5	6 jours	61DD+1 jour
63	1.3.6.3	Cure béton poteaux R+	3 jours	62DD+1 jour
64	1.3.6.4	Coffrage poutres + acr	14 jours	61DD+1 jour



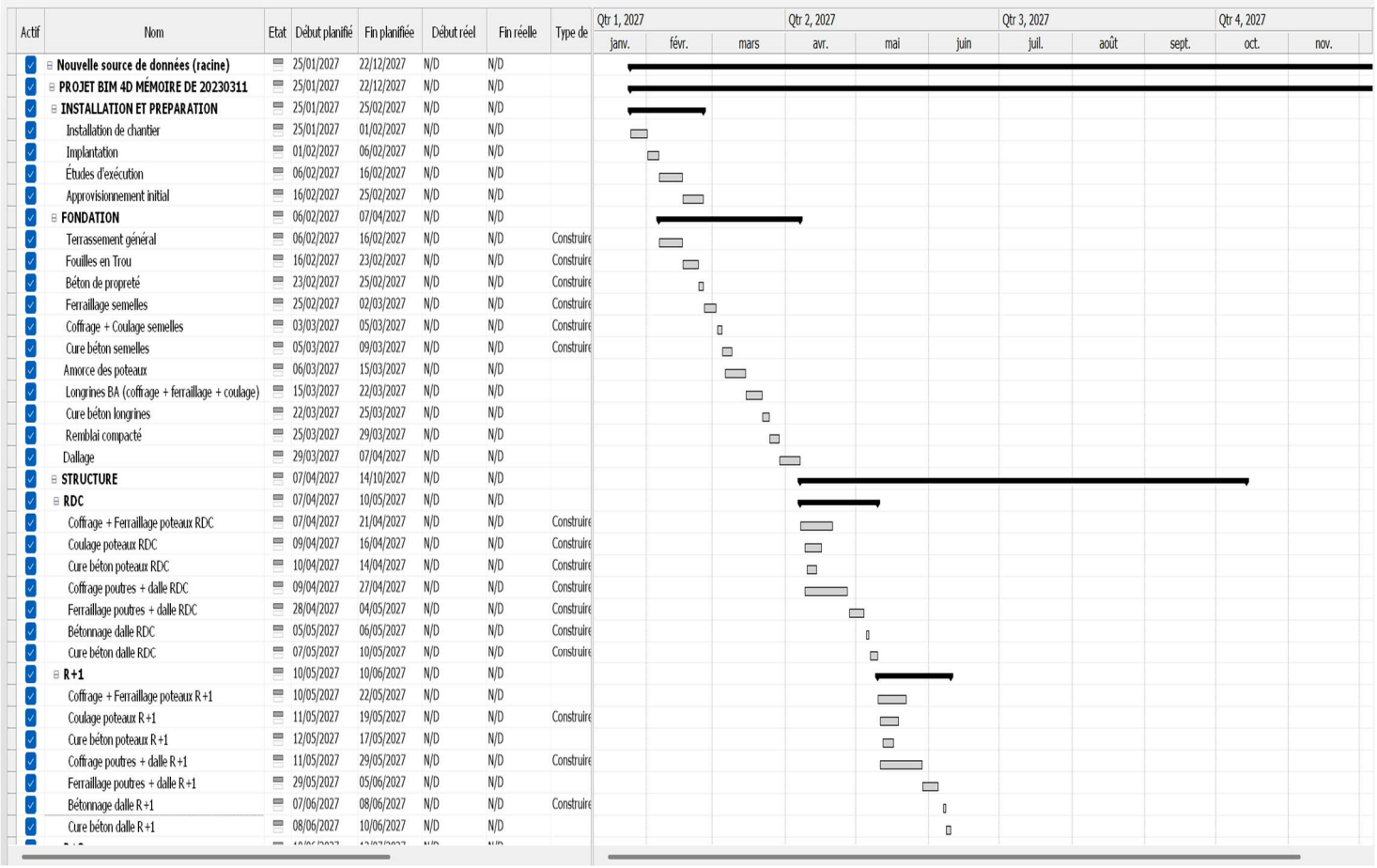
Page 2

N°	WBS	Nom de la tâche	Durée	Prédécesseurs
65	1.3.6.5	Ferraillage dalle toiture	5 jours	64
66	1.3.6.6	Bétonnage dalle toiture	1 jour	65FD+1 jour
67	1.3.6.7	Cure béton toiture	2 jours	66
68	1.4	ACCESSIBILITE ET PROTECTION	77 jours	
69	1.4.1	Escaliers (coffrage + ferraillage + coulage)	8 jours	24;66FF
70	1.4.2	Étanchéité toiture	5 jours	67
71	1.4.3	Maçonnerie murs (tous niveaux)	47 jours	43
72	1.5	SECOND OEUVRE	95 jours	
73	1.5.1	Enduits intérieurs	20 jours	81;83
74	1.5.2	Enduits extérieurs	15 jours	71
75	1.5.3	Chapes	15 jours	73
76	1.5.4	Carrelage	20 jours	75
77	1.5.5	Faux plafonds	15 jours	73
78	1.5.6	Menuiserie aluminium (portes/fenêtres)	10 jours	73
79	1.5.7	Menuiserie bois intérieur	10 jours	73
80	1.5.8	Vitrerie	7 jours	78
81	1.5.9	Réseau électrique encastr	20 jours	71DD+20 jour
82	1.5.10	Tableau électrique	5 jours	81
83	1.5.11	Plomberie eau froide + eau chaude	15 jours	71DD+20 jours
84	1.5.12	Sanitaires	10 jours	76;83
85	1.5.13	Peinture intérieure	20 jours	77;79;76
86	1.5.14	Peinture extérieure	10 jours	74
87	1.6	FINITION EXTERIEURE	46 jours	
88	1.6.1	Voirie, trottoirs et parking	7 jours	86
89	1.6.2	Raccordement réseaux (eau/élec/assainis.)	5 jours	88
90	1.6.3	Clôture et portail	5 jours	88
91	1.6.4	Nettoyage général	3 jours	85
92	1.7	RECEPTION	4 jours	
93	1.7.1	Levée des réserves	3 jours	91
94	1.7.2	Réception des travaux	1 jour	93

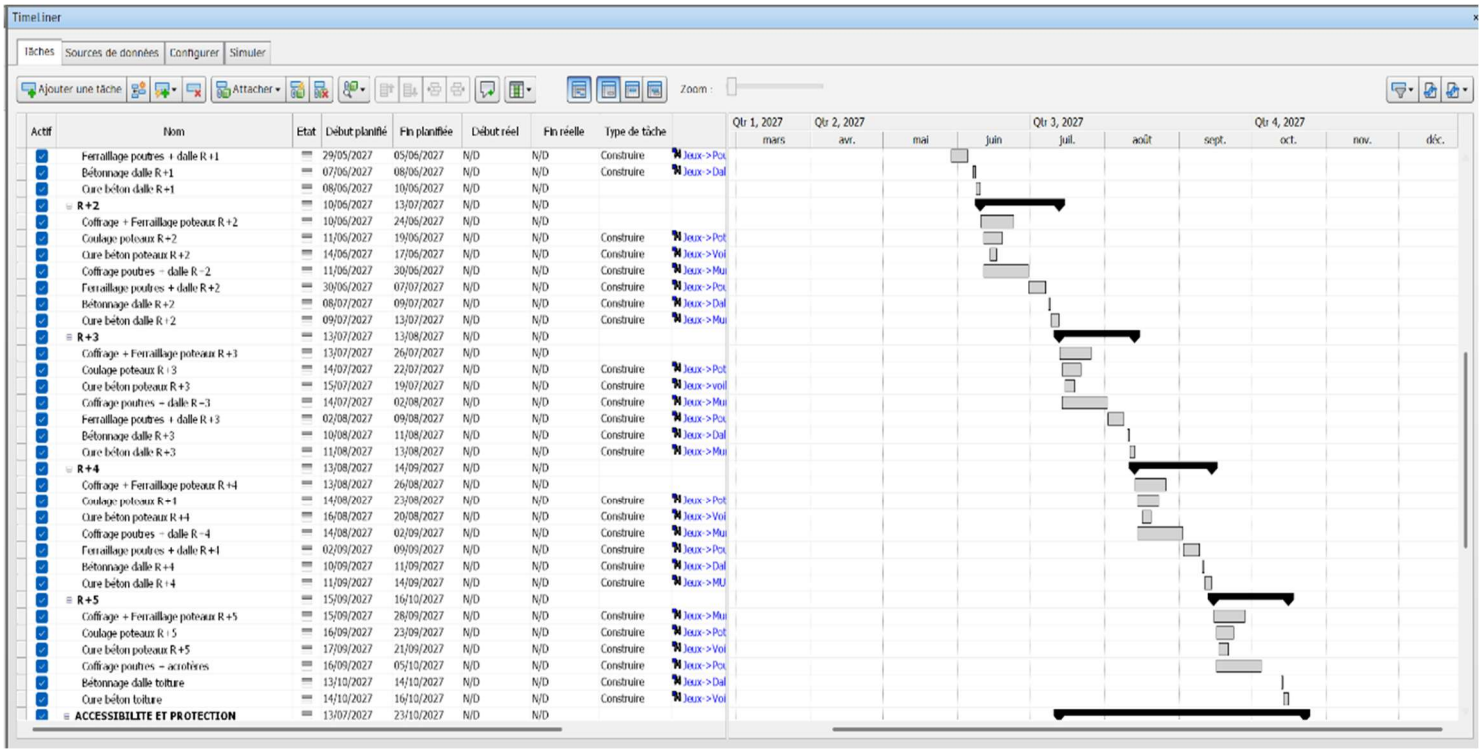


Page 3

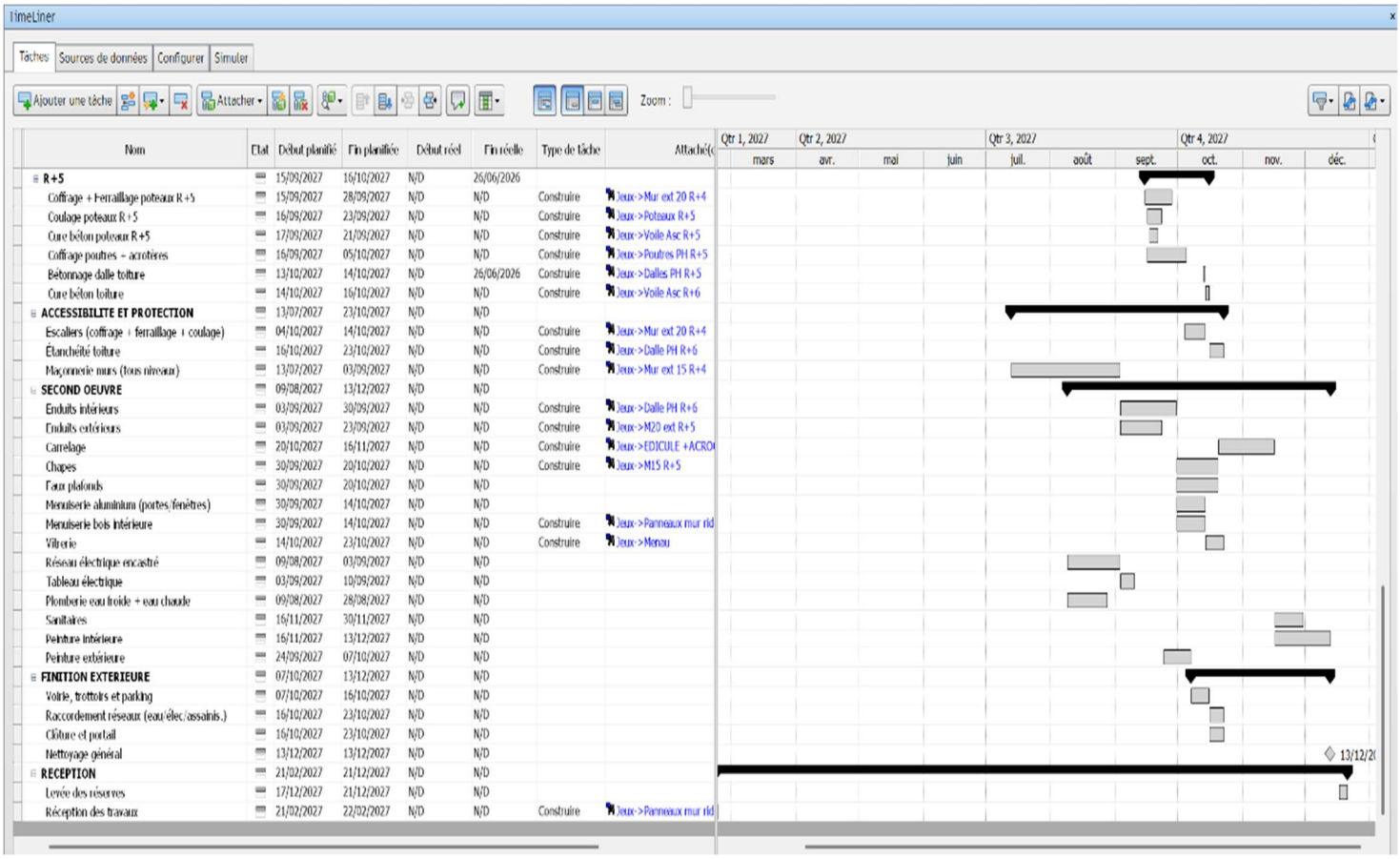
Liaison des tâches avec la maquette BIM



Actif	Nom	Etat	Début planifié	Fin planifiée	Début réel	Fin réelle	Type de
☑	**Nouvelle source de données (racine)**		25/01/2027	22/12/2027	N/D	N/D	
☑	**PROJET BIM 4D MÉMOIRE DE 20230311**		25/01/2027	22/12/2027	N/D	N/D	
☑	**INSTALLATION ET PREPARATION**		25/01/2027	25/02/2027	N/D	N/D	
☑	Installation de chantier		25/01/2027	01/02/2027	N/D	N/D	
☑	Implantation		01/02/2027	06/02/2027	N/D	N/D	
☑	Études d'exécution		06/02/2027	16/02/2027	N/D	N/D	
☑	Approvisionnement initial		16/02/2027	25/02/2027	N/D	N/D	
☑	**FONDATION**		06/02/2027	07/04/2027	N/D	N/D	
☑	Terrassement général		06/02/2027	16/02/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Fouilles en Trou		16/02/2027	23/02/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Béton de propreté		23/02/2027	25/02/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Ferraillage semelles		25/02/2027	02/03/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Coffrage + Coulage semelles		03/03/2027	05/03/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Cure béton semelles		05/03/2027	09/03/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Amorce des poteaux		06/03/2027	15/03/2027	N/D	N/D	
☑	Longrines BA (coffrage + ferraillage + coulage)		15/03/2027	22/03/2027	N/D	N/D	
☑	Cure béton longrines		22/03/2027	25/03/2027	N/D	N/D	
☑	Remblai compacté		25/03/2027	29/03/2027	N/D	N/D	
☑	Dallage		29/03/2027	07/04/2027	N/D	N/D	
☑	**STRUCTURE**		07/04/2027	14/10/2027	N/D	N/D	
☑	**RDC**		07/04/2027	10/05/2027	N/D	N/D	
☑	Coffrage + Ferraillage poteaux RDC		07/04/2027	21/04/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Coulage poteaux RDC		09/04/2027	16/04/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Cure béton poteaux RDC		10/04/2027	14/04/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Coffrage poutres + dalle RDC		09/04/2027	27/04/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Ferraillage poutres + dalle RDC		28/04/2027	04/05/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Bétonnage dalle RDC		05/05/2027	06/05/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Cure béton dalle RDC		07/05/2027	10/05/2027	N/D	N/D	Construire
☑	**R+1**		10/05/2027	10/06/2027	N/D	N/D	
☑	Coffrage + Ferraillage poteaux R+1		10/05/2027	22/05/2027	N/D	N/D	
☑	Coulage poteaux R+1		11/05/2027	19/05/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Cure béton poteaux R+1		12/05/2027	17/05/2027	N/D	N/D	
☑	Coffrage poutres + dalle R+1		11/05/2027	29/05/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Ferraillage poutres + dalle R+1		29/05/2027	05/06/2027	N/D	N/D	
☑	Bétonnage dalle R+1		07/06/2027	08/06/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Cure béton dalle R+1		08/06/2027	10/06/2027	N/D	N/D	

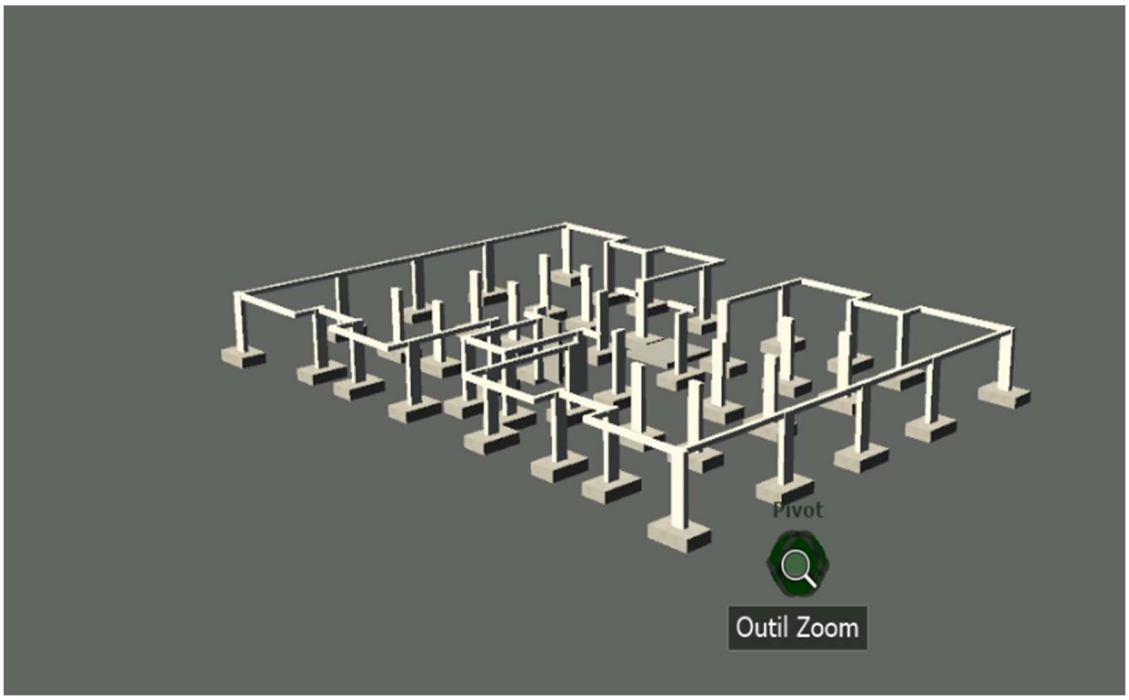


Actif	Nom	Etat	Début planifié	Fin planifiée	Début réel	Fin réelle	Type de tâche
☑	Ferraillage poutres + dalle R+1		29/05/2027	05/06/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Bétonnage dalle R+1		07/06/2027	08/06/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Cure béton dalle R+1		08/06/2027	10/06/2027	N/D	N/D	
☑	**R+2**		10/06/2027	13/07/2027	N/D	N/D	
☑	Coffrage + Ferraillage poteaux R+2		10/06/2027	24/06/2027	N/D	N/D	
☑	Coulage poteaux R+2		11/06/2027	19/06/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Cure béton poteaux R+2		14/06/2027	17/06/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Coffrage poutres - dalle R-2		11/06/2027	30/06/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Ferraillage poutres + dalle R+2		30/06/2027	07/07/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Bétonnage dalle R+2		08/07/2027	09/07/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Cure béton dalle R+2		09/07/2027	13/07/2027	N/D	N/D	Construire
☑	**R+3**		13/07/2027	13/08/2027	N/D	N/D	
☑	Coffrage + Ferraillage poteaux R+3		13/07/2027	26/07/2027	N/D	N/D	
☑	Coulage poteaux R+3		14/07/2027	22/07/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Cure béton poteaux R+3		15/07/2027	19/07/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Coffrage poutres - dalle R-3		14/07/2027	02/08/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Ferraillage poutres + dalle R+3		02/08/2027	09/08/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Bétonnage dalle R+3		10/08/2027	11/08/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Cure béton dalle R+3		11/08/2027	13/08/2027	N/D	N/D	Construire
☑	**R+4**		13/08/2027	14/09/2027	N/D	N/D	
☑	Coffrage + Ferraillage poteaux R+4		13/08/2027	26/08/2027	N/D	N/D	
☑	Coulage poteaux R+4		14/08/2027	23/08/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Cure béton poteaux R+4		16/08/2027	20/08/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Coffrage poutres - dalle R-4		14/08/2027	02/09/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Ferraillage poutres + dalle R+4		02/09/2027	09/09/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Bétonnage dalle R+4		10/09/2027	11/09/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Cure béton dalle R+4		11/09/2027	14/09/2027	N/D	N/D	Construire
☑	**R+5**		15/09/2027	16/10/2027	N/D	N/D	
☑	Coffrage + Ferraillage poteaux R+5		15/09/2027	28/09/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Coulage poteaux R+5		16/09/2027	23/09/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Cure béton poteaux R+5		17/09/2027	21/09/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Coffrage poutres - acrotères		16/09/2027	05/10/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Bétonnage dalle toiture		13/10/2027	14/10/2027	N/D	N/D	Construire
☑	Cure béton toiture		14/10/2027	16/10/2027	N/D	N/D	Construire
☑	**ACCESSIBILITE ET PROTECTION**		13/07/2027	23/10/2027	N/D	N/D	

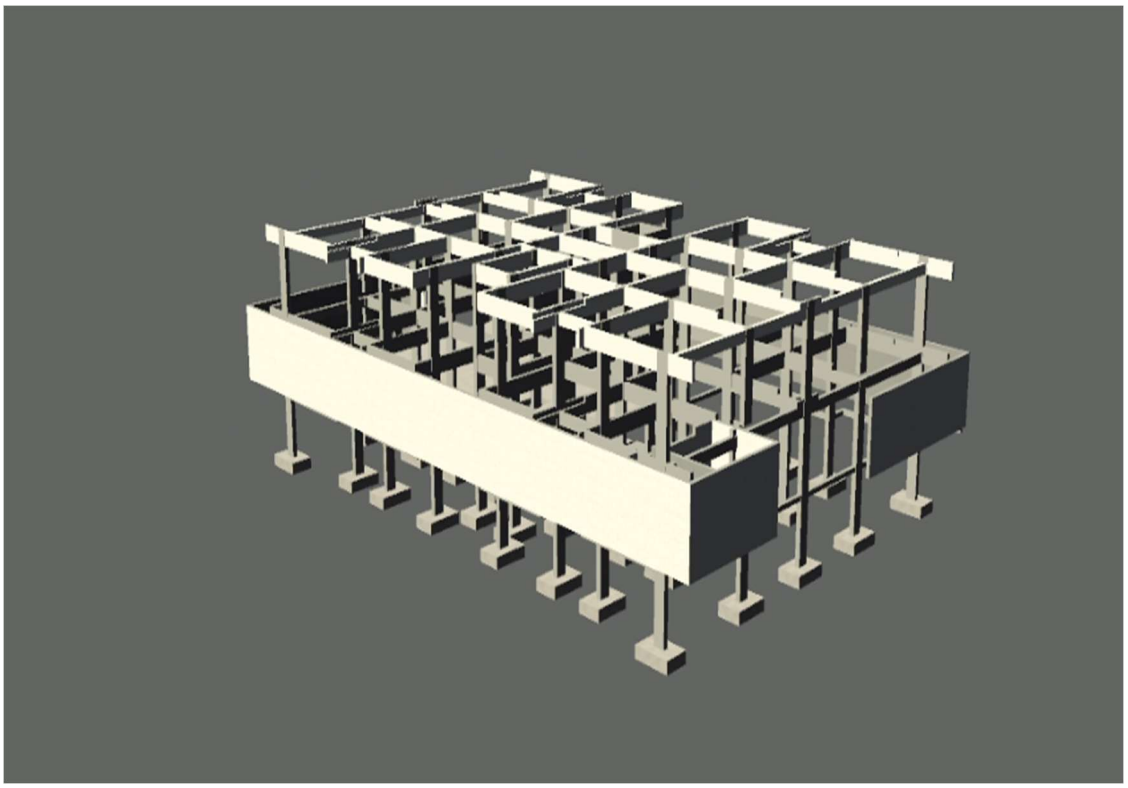


Simulation 4D sous Navisworks

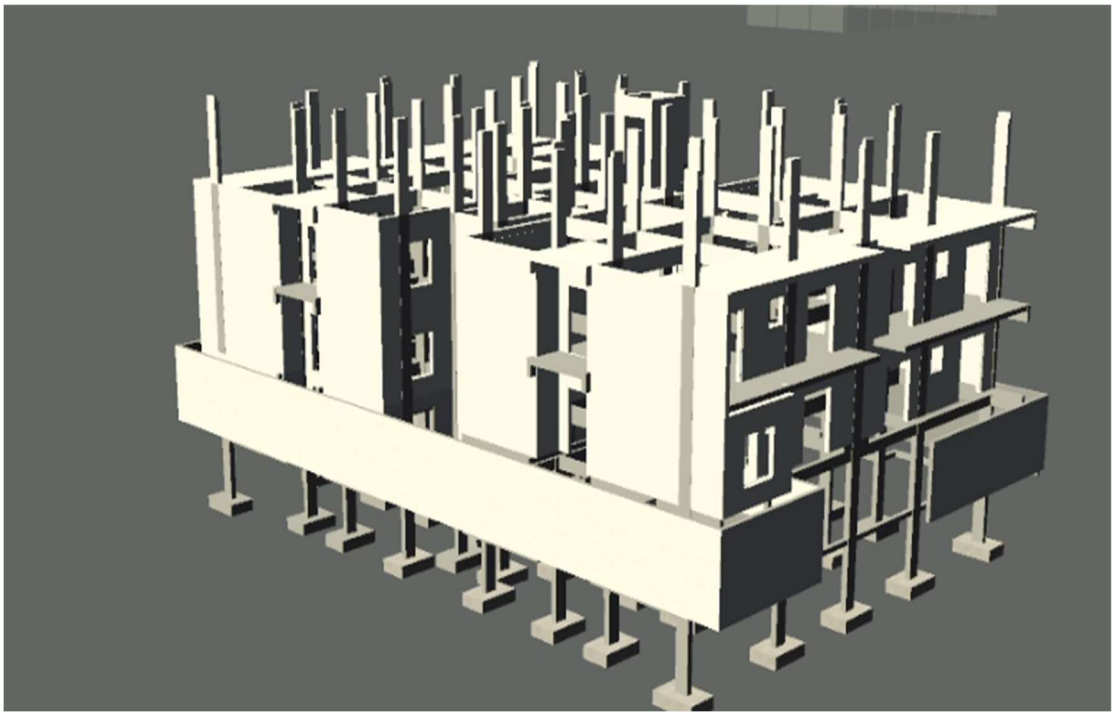
Sequence 1



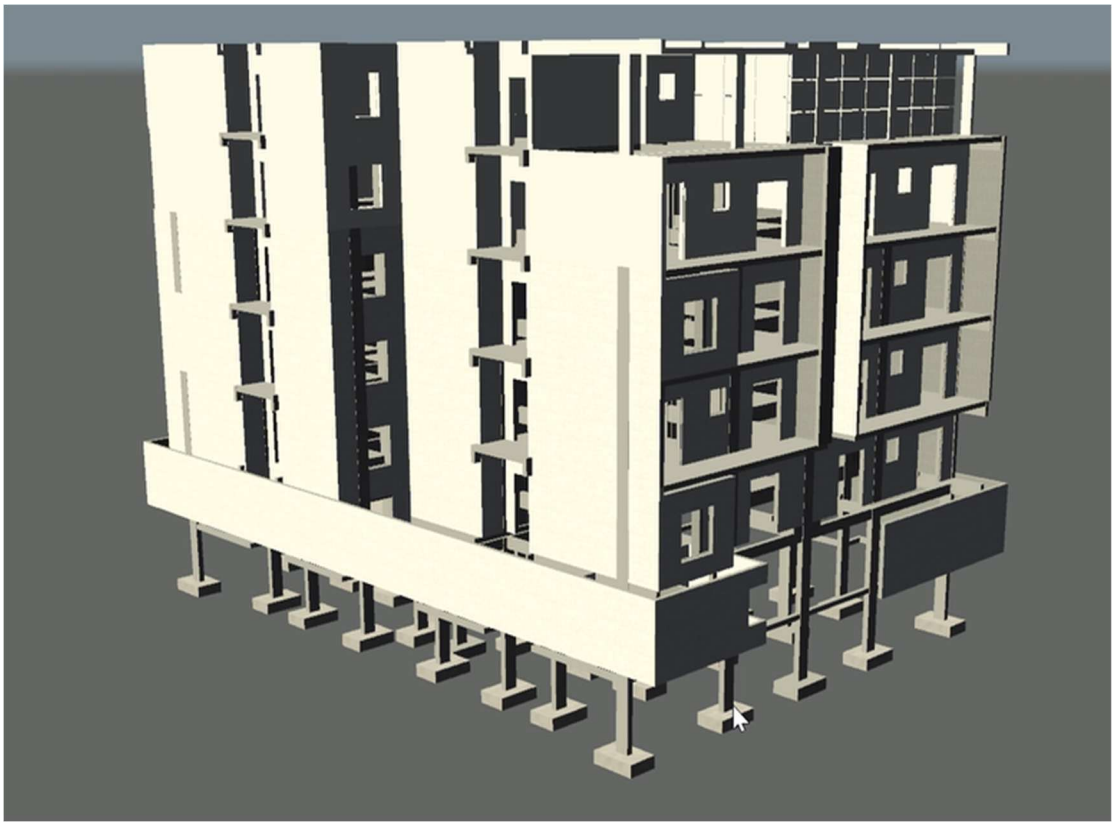
Sequence 2



Sequence 3



Sequence 4



Sequence 5



Annexe 5 : BIM 5D - Estimation des coûts

Extraction des quantités : cas des Murs du projet

Élément	Longueur (cm)	Surface (m^2)	Volume (m^3)
MUR 20	613,5	17	3,94
	120	3	0,75
	280,5	4	0,94
	120	3	0,75
	396	11	2,46
	817,5	17	3,86
	518	14	3,22
	256	7	1,59
	709,5	15	3,21
	456	12	2,83
	1984,5	35	8,07
Somme (MUR 20)	**6271,5**	**138**	**31,62**
MUR 15 EXT	157,5	4	0,75
	60	1	0,25
	166,5	4	0,75
	3231	88	15,79
	2140	57	10,31
	867	24	4,26
	356	9	1,64
Somme (MUR 15 EXT)	**6978**	**187**	**33,75**

Élément	Longueur (cm)	Surface (m^2)	Volume (m^3)
MUR 20	611	20	4,67
	120	4	0,88
	280,5	6	1,26
	396	13	2,91
	817,5	21	4,8
	518	17	3,81
	1622,5	36	8,37
	709,5	18	3,96
	456	15	3,36
Somme (MUR 20)	**5531**	**150**	**34,02**
MUR 15	300,5	7	1,3
	424,5	10	1,87
	458,5	13	2,34
	180	5	0,87
	846	25	4,48
	398,5	9	1,67
	338,5	8	1,39
	395	12	2,13
Somme (MUR 15)	**3341,5**	**89**	**16,05**

Élément	Longueur (cm)	Surface (m²)	Volume (m³)
MUR 20	622,5	20	4,67
	280,5	6	1,26
	396	13	2,91
	817,5	21	4,8
	518	17	3,81
	1984,5	43	10,01
	709,5	18	3,88
Somme	**5328,5**	**138**	**31,34**
MUR 15	300,5	7	1,3
	424,5	10	1,87
	458,5	13	2,37
	180	5	0,87
	846	25	4,51
	398,5	9	1,67
	338,5	8	1,39
Somme	**2946,5**	**77**	**13,98**

Élément	Longueur (cm)	Surface (m²)	Volume (m³)
MUR 20	611	20	4,67
	396,5	13	2,92
	817	19	4,23
	518	17	3,81
	1230	33	7,47
	709,5	16	3,75
Somme (MUR 20)	**4282**	**118**	**26,85**
MUR 15	869,5	23	4,14
	560	16	2,96
	717,5	21	3,7
	455,5	11	1,91
	678,5	18	3,27
	697,5	19	3,47
Somme (MUR 15)	**3978,5**	**108**	**19,45**

Métré Gros œuvre second œuvre à partir des extractions

GROS-ŒUVRE					
N°	DESIGNATIONS	UNITE	QUANTITE	PRIX UNITAIRE	PRIX TOTAL
A	TERRASSEMENTS& PREPARATION DU CHANTIER				
1	Amenée et repli de matériel	Ens	1,0	200 000	200 000
2	Fouilles en puit pour semelles isolées	m³	440,0	1 886	829 840
3	Fouilles en tranchée pour longrines	m³	12,3	1 162	14 299
4	Remblais sous dallage	m³	26,8	1 200	32 160
5	Remblais au droit des fondations avec terres extraites des fouilles	m³	339,1	1 505	510 285
6	Evacuation des déblais	m³	100,9	1 500	151 410
	Sous Total Terrassements&preparation				1 737 994
I/	FONDATION				
1	Béton de propreté Ep=5 cm	m³	8,8	65 000	572 000
2	Béton dosé à 350kg/m3 pour semelles	m³	85,4	125 000	10 670 000
3	Béton dosé à 350kg/m3 pour longrines	m³	11,0	125 000	1 368 750
4	Béton dosé à 350kg/m3 pour amorce poteaux	m³	15,6	125 000	1 947 500
5	Béton dosé à 300kg/m3 pour dallage sol	m³	40,4	80 000	3 232 800
6	mur de soubassement en agglos pleins de 15	m²	243,0	6 045	1 468 979
	Sous total fondation				19 260 029
II/	RDC				
1	Béton dosé à 350kg/m3 pour poutres et poteaux	m³	43,7	125 000	5 458 750
2	Plancher hourdis 16+4	m²	317,0	9 500	3 011 500
3	Plancher dalle pleine	m³	30,7		
4	Maçonnerie d'agglos creux de 20cm	m²	207,0	5 048	
5	Maçonnerie d'agglos creux de 15cm	m²	487,0	5 048	2 458 376
6	Enduits intérieurs	m²	1056,0	1 500	1 584 000
7	Enduits extérieurs	m²	849,0	1 500	1 273 500
8	Enduits sous face	m²	393,0	1 500	589 500
	Sous total RDC				14 375 626
III/	ETAGE				
1	Béton dosé à 350kg/m3 pour poutres et poteaux	m³	211,8	125 000	26 475 000
2	Plancher hourdis 16+4	m²	2841,2	9 500	26 991 638
3	Plancher dalle pleine	m³	161,6	9 500	1 534 725
4	Maçonnerie d'agglos creux de 20cm	m²	2020,0	9 500	19 190 000
5	Maçonnerie d'agglos creux de 15cm	m²	1845,9	5 048	9 318 255
6	Enduits intérieurs	m²	5557,9	5 048	28 056 077
7	Enduits extérieurs	m²	2337,0	1 500	3 505 500
8	Enduits sous face	m²	2922,0	1 500	4 383 000
	Sous total ETAGE				119 454 194
IV/	TERRASSE				
1	Béton dosé à 350kg/m3 pour poutres et poteaux	m³	0,8	125 000	105 000
2	Acrotere	m³	37,1	5 048	187 180
3	Enduits intérieurs	m²	163,0	1 500	244 500
4	Enduits extérieurs	m²	163,0	1 500	244 500
5	Forme de Pente sur terrasse acessible	m²	192,0	3 025	580 800
	Sous Total Terrasse				1 361 980
	TOTAL GROS OEUVRE				156 189 823

Gros Oeuvre

SECOND ŒUVRE					
N°	Designation	U	Qté	P.Unitaire	P.total
A/	RDC				
I/	MENUISERIES				
	BOIS				
1	Porte : F et P de porte en panneau y/c cadre enfuisserie bois ,				
2	Avec panneau latéral: Porte d'entrée de 120	u	18,0	105 000	1 890 000
3	Ext. Double: Porte de 120	u	20,0	110 000	2 200 000
4	Porte d'entrée: Porte de 90	u	39,0	130 000	5 070 000
5	PVC Double - Panneaux vitrés haut: Porte Extérieur de 160	u	40,0	160 000	6 400 000
	Simple avec alignement: Porte de 80	u	39,0	160 000	6 240 000
	Sous total menuiserie bois:				21 800 000
	ALUMITRERIE				
6	2 Vantaux coul. - Imposte haute: 1.20m x 1.30m	u	21,0	140 000	2 940 000
7	2 Vantaux coul. - Imposte haute: fenetre de 80x80	u	44,0	110 000	4 840 000
8	2 Vantaux coul. - Imposte haute: Fenetre de 160x150	u	24,0	160 000	3 840 000
	2 Vantaux fixes - Traverse horizontale: 1.25m x 0.9m	u	1,0	160 000	160 000
	Mur Rideau	m²	69,0	280 000	19 320 000
9	Vitrine	m²	19,0	280 000	5 320 000
	Sous total menuiserie Alu :				36 420 000
	MENUISERIE METALLIQUE				
	Grille de pprtail				
10	Portail de vantaux motorisé	u	1	1 300 000,0	1 300 000
	Sous total menuiserie métallique:				1 300 000
	TOTAL MENUISERIES				59 520 000
IV/	REVETEMENT-CARRELAGE				
1	F et P de carreaux gré Cérame 60 x 60	m²	0,0	10 500,0	0
2	Dito plinthes	ml	0,0	2 000,0	0
3	F et P de carreaux faïnces	m²	0,0	7 500,0	0
	TOTAL REVETEMENT - CARRELAGE :				0
V/	PEINTURE				
1	Peinture acrylique sur maçonnerie intérieure et sous plafond application de deux couches de peinture acrylique type PANTEX	m²	0,0	2 500,0	0
2	Peinture sur maçonnerie extérieure type PANTIGRE	m²	0,0	3 000,0	0
	TOTAL PEINTURE :				0
VI/	AMENAGEMENT EXTERIEUR				
	Mur de clôture (hauteur 3,00m)	ml	0,0	25 000,0	0
	TOTAL AMENAGEMENT EXTERIEUR :				0
	TOTAL GENERAL SECOND ŒUVRE				59 520 000

Second Œuvre

Annexe 6 : Détection des conflits

Liste des conflits détectés

