

UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

**ANALYSE ET RENFORCEMENT STRUCTUREL D'UN
BATIMENT EN VUE D'UNE EXTENSION EN HAUTEUR :**

Cas d'un ouvrage privé en cours d'exécution à Goma.

Par **LIMENYANDE LUVAO Yvon**

Travail présenté et défendu en vue de l'obtention du
Diplôme de Licence en Sciences de l'Ingénieur.

Option : Génie Civil

Directeur : Prof. Ing. BISHWEKA B. Chérif

Encadreur : Ing. MBUSA MUYISA Isaac

ANNEE ACADEMIQUE 2024 - 2025

EPIGRAPHE

« La technique est l'art de rendre possible ce qui est nécessaire. »

Eugène Freyssinet

DEDICACE

Aux familles LIMENYANDE, LUVAO et MITIMA

LIMENYANDE LUVAO Yvon

REMERCIEMENTS

À Dieu Tout-Puissant, nous exprimons notre profonde gratitude pour nous avoir accordé la force, l'intelligence, la sagesse et la persévérance nécessaires à la réalisation de ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à l'Université Libre des Pays des Grands Lacs, en particulier au corps professoral de la Faculté des Sciences et Technologies, Département de Génie Civil, pour la formation reçue tout au long de notre parcours universitaire. Nos remerciements les plus respectueux s'adressent à notre directeur de travail, le Prof. Ing. BISHWEKA B. Cherif, pour avoir accepté de nous diriger malgré ses multiples occupations. Nous exprimons également notre reconnaissance à notre encadreur, l'Ingénieur MBUSA MUYISA Isaac, pour sa disponibilité, son accompagnement technique et ses remarques constructives.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos parents, en particulier notre mère, MITIMA MAYEKE Pascasie pour les sacrifices consentis, le soutien moral, matériel et financier constants qui nous ont permis de progresser chaque jour dans notre parcours académique et personnel. Nos sincères remerciements vont également à nos frères et sœurs, Sylvie U., Guilaine L., Christian H., Jean-Marie L., Sandrine L., Kethia L., ainsi qu'à tous les membres des familles **LIMENYANDE**, **LUVAO** et **MITIMA**, pour leur amour indéfectible.

Nous adressons nos remerciements chaleureux à nos camarades et amis, en particulier Kethia K., Vital N., Phillippe K., Anselme A., Elie C, Noah M., Naomie M, Juliette K., Christian A., Patrick M., Josette B., Jordan K., Daniel N., pour l'esprit de solidarité, l'entraide et les moments de partage qui ont rendu ce parcours académique enrichissant et inoubliable.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail. Que chacun trouve ici l'expression sincère de notre profonde reconnaissance.

RESUME

Le présent travail vise à évaluer la capacité portante d'un bâtiment en béton armé initialement conçu pour R+3, afin de vérifier la faisabilité technique d'une extension en hauteur.

La méthodologie adoptée repose sur une revue de la littérature, un diagnostic de la structure existante, l'analyse des plans disponibles et une modélisation numérique réalisée à l'aide du logiciel Autodesk Robot Structural Analysis Professional.

Les résultats ont permis d'identifier les éléments les plus sollicités, notamment les poteaux des niveaux inférieurs, et de montrer que la structure est suffisamment dimensionnée pour son état initial et pour une extension à R+4, tandis que l'ajout de deux niveaux supplémentaires (R+5) entraîne un dépassement de la capacité portante des éléments critiques.

Face à cette insuffisance, le renforcement par chemisage en béton armé a été retenu comme solution technique. Les simulations réalisées après renforcement mettent en évidence une amélioration significative de la capacité portante des éléments renforcés, rendant techniquement faisable l'extension en hauteur envisagée.

Ainsi, cette étude souligne l'importance d'une analyse structurelle rigoureuse avant toute surélévation et démontre que le chemisage en béton armé constitue une solution efficace et adaptée au contexte local de la ville de Goma.

Mots-clés : Surélévation ; Analyse structurelle ; Renforcement structurel ; Chemisage en béton armé ; Modélisation numérique.

ABSTRACT

This study aims to assess the load-bearing capacity of a reinforced concrete building originally designed for G+3, in order to verify the technical feasibility of a vertical extension.

The adopted methodology is based on a literature review, a diagnosis of the existing structure, analysis of the available plans, and numerical modeling performed using Autodesk Robot Structural Analysis Professional.

The results allowed the identification of the most stressed elements, particularly the columns on the lower levels, and showed that the structure is sufficiently designed for its initial state and for an extension to G+4, while the addition of two extra floors (G+5) leads to an exceedance of the load-bearing capacity of critical elements.

In response to this insufficiency, strengthening by reinforced concrete jacketing was selected as the technical solution. Simulations performed after strengthening revealed a significant improvement in the load-bearing capacity of the reinforced elements, making the proposed vertical extension technically feasible.

Thus, this study highlights the importance of rigorous structural analysis before any vertical extension and demonstrates that reinforced concrete jacketing constitutes an effective and suitable solution within the local context of the city of Goma.

Keywords: Vertical extension; Structural analysis; Structural strengthening; Reinforced concrete jacketing; Numerical modeling.

TABLE DE MATIERES

DEDICACE	2
REMERCIEMENTS.....	3
RESUME	4
TABLE DE MATIERES	6
LISTE DES ABREVIATIONS	9
LISTE DES FIGURES	10
LISTE DES TABLEAUX.....	11
INTRODUCTION GENERALE.....	12
0.1. Contexte/Généralités sur le thème	12
0.2. Identification et formulation du problème.....	13
0.3. Questions de recherche.....	13
0.4. Formulation des hypothèses	14
0.5. Justification du choix du sujet et motivations.....	14
0.6. Énoncé des objectifs de recherche	15
0.7. Méthodologie et délimitation du travail	15
0.8. Structure du mémoire/ Subdivision du travail	16
Chapitre 1 . GENERALITES SUR LES METHODES DE DIAGNOSTIQUES ET RENFORCEMENT STRUCTURELLES.....	17
1.1 INTRODUCTION PARTIELLE	17
1.2 THERMINOLOGIE.....	18
1.3 CLASSIFICATION DES METHODES DE DIAGNOSTICS DES ELEMENTS DEJA CONSTRUITS.....	19

1.3.1	Méthodes non destructives	19
1.3.2	Méthodes destructives [1].....	23
1.4	APERÇU SUR LES TECHNIQUES DES RENFORCEMENTS	24
1.4.1	Renforcement en béton armé	24
1.4.2	Renforcement en acier.....	26
1.4.3	Renforcement par matériaux composites	27
1.4.4	Autres techniques des renforcements.....	28
1.5	CONCLUSION PARTIELLE	30
Chapitre 2 METHODOLOGIE		31
2.1	INTRODUCTION PARTIELLE	31
2.2	CHOIX DES METHODES	32
2.2.1	Diagnostic de la structure existante.....	32
2.2.2	Méthode de renforcement retenue.....	34
2.3	RECOLTE DE DONNES.....	35
2.3.1	Observation directe	36
2.3.2	Analyse des données obtenus grâce aux scléromètres	37
2.3.3	Analyse de plan de ferrailage	38
2.4	PROCEDE DU CHEMISAGE EN BETON ARMEE	39
2.4.1	Principe du procédé.....	39
2.4.2	Étapes du procédé (Mode opératoire : Cas d'un poteau) [8].....	39
2.4.3	Disposition possible d'armature	43
2.5	PRESENTATION DU LOGICIEL ROBOT [9]	44
2.6	CADRE DE VERIFICATION REGLEMENTAIRE.	45
2.7	CONCLUSION PARTIELLE	46
Chapitre 3 PRESENTATION DES RESULTATS		47
3.1	INTRODUCTION PARTIELLE	47
3.2	PRESENTATION DE L'OUVRAGE.....	48
3.3	PRESENTATION DU MODEL NUMERIQUE.....	50

3.3.1	Hypothèses de modélisation	50
3.3.2	Description du model 3D.....	52
3.4	ANALYSE DES RESULTATS POUR LA STRUCTURE INITIALEMENT CONÇUE	53
3.4.1	Identification des éléments les plus sollicités	53
3.4.2	Vérification de la capacité portante.....	54
3.5	ANALYSE DES RESULTAT APRES AJOUT D'ETAGES SUPPLEMENTAIRES 55	
3.6	PROPOSITION DU RENFORCEMENT PAR CHEMISAGE EN BETON ARME 57	
3.6.1	Principe de renforcement retenu	57
3.6.2	Résultat après renforcement	57
3.7	PRESENTATION DES NOUVEAUX PLANS DE FERRAILLAGE	58
3.8	JUSTIFICATION STRUCTURELLE DU RENFORCEMENT PAR CHEMISAGE EN BETON ARME PAR RAPPORT AU DIMENSIONNEMENT INITIAL	59
3.9	CONCLUSION PARTIELLE	60
	CONCLUSION GENERALE	61
	BIBLIOGRAPHIE	64
	ANNEXES	65

LISTE DES ABREVIATIONS

- BA : Béton Armé
- BAEL : Béton Armé aux États Limites
- ULPGL : Université Libre des Pays des Grands Lacs
- R+3 : Bâtiment de Rez-de-chaussée plus trois étages
- R+4 : Bâtiment de Rez-de-chaussée plus quatre étages
- R+5 : Bâtiment de Rez-de-chaussée plus étages
- ELU : État Limite Ultime
- ELS : État Limite de Service
- MPa : Méga pascal
- kN : Kilo newton
- kN/m² : Kilo newton par mètre carré
- cm : Centimètre
- m : Mètre
- Ø : Diamètre
- RSA : Robot Structural Analysis

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Essaie avec ausculteur sonique [1].....	20
Figure 1-2 : Essai au scléromètre	21
Figure 1-3 : Pachnometre	21
Figure 1-4 : Profometre	22
Figure 1-5 : Corrosimetre	22
Figure 1-6 Chemisage d'un poteau	25
Figure 1-7 Chemisage en acier d'un poteau [1].....	26
Figure 1-8 Chemisage en fibre d'un poteau	28
Figure 1-9 Renforcement d'un poteau carre par précontrainte externe.....	28
Figure 1-10 Renforcement en béton armée par voiles de contreventement.	29
Figure 2-1 : Dispositions possibles d'armatures sur poteau [1].....	43
Figure 2-2 : Cas des armatures Horizontales soudées avec les anciennes un seul côtes.....	44
Figure 3-1 Rendu de l'immeuble Guillain Appartement tel que conçu initialement.	48
Figure 3-2 Plan rez-de-chaussée avec indication de l'emplacement de poteau.....	Error!
Bookmark not defined.	
Figure 3-3 Modelisation en 3D de la Structure dans Robot.....	52
Figure 3-4 Emplacement du poteau 122 (le poteau le plus chargée)	53
Figure 3-5 Plan d'exécution initiale des poteaux.....	54
Figure 3-6 Modélisation 3D de la Structure après ajout du niveau supplémentaire	55
Figure 3-7 Modélisation 3D de la Structure après ajout de 2 niveaux supplémentaire.....	56
Figure 3-8 Plan de ferrailage du poteau les plus charge après renforcement.	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 Evaluation de la charge permanente de murs [9].....	51
Tableau 3-2 Evaluation de la charge permanente pour les recouvrement de la dalle [9].....	51

INTRODUCTION GENERALE

0.1. Contexte/Généralités sur le thème

Dans un contexte urbain tel que celui de la ville de Goma, marqué par une croissance démographique rapide et une pression foncière accrue, les projets de construction sont fréquemment confrontés à des modifications en cours d'exécution. Il n'est pas rare que certains maîtres d'ouvrage exigent des adaptations substantielles par rapport aux projets initialement conçus, notamment l'augmentation du nombre de niveaux. Autrement dit, la surélévation des bâtiments au-delà des prévisions initiales constitue une tendance récurrente, généralement motivée par des considérations économiques, la volonté de maximiser la rentabilité du terrain ou encore l'évolution imprévue des besoins fonctionnels du bâtiment.

Cependant, l'ajout de niveaux supplémentaires engendre des enjeux structurels majeurs. Les structures en béton armé sont dimensionnées sur la base des charges correspondant aux hypothèses définies lors de la conception initiale. Toute modification du nombre d'étages entraîne une augmentation des charges permanentes et d'exploitation, pouvant dépasser la capacité portante des éléments porteurs existants. Associée à des conditions d'exécution parfois insuffisamment contrôlées, cette pratique expose les ouvrages à des risques de désordres structurels, tels que la fissuration excessive ou dans les cas extrêmes, l'instabilité globale de la structure [1].

Face à ces réalités, le présent travail se propose d'analyser la structure d'un bâtiment en cours d'exécution initialement conçu pour quatre niveaux, d'évaluer sa capacité à supporter l'ajout d'un niveau supplémentaire ou plus et de définir les solutions de renforcement permettant d'augmenter sa capacité portante. L'objectif est de démontrer que toute opération de surélévation doit impérativement reposer sur une analyse structurelle rigoureuse, conforme aux principes de calcul des structures en béton armé, afin de garantir la sécurité des usagers, la durabilité de l'ouvrage et le respect des règles fondamentales du génie civil [2].

0.2. Identification et formulation du problème

Le défi principal de ce travail réside dans la faisabilité à concevoir et mettre en œuvre cette surélévation sans compromettre la stabilité et la durabilité de l'ouvrage.

Dans le cas de notre ouvrage en cours d'exécution (Conçu R+3), l'objectif premier est de vérifier si une extension d'un niveau supplémentaire ou plus est envisageable, tout en respectant les contraintes structurelles et réglementaires.

Et puis autour de ce défi central gravitent trois problèmes de second ordre :

- **Les caractéristiques physiques des matériaux** déjà en place (béton, acier), qu'il faut définir afin de disposer de données fiables.
- **La capacité portante de la structure existante**, qui doit être évaluée pour déterminer si elle peut supporter les charges induites par les niveaux additionnels.
- **La technique de renforcement**, qui pourrait nous permettre d'augmenter la capacité de la structure à supporter les nouvelles charges.

0.3. Questions de recherche

La problématique de ce travail sera guidée par les questions suivantes :

- Comment peut-on déterminer les caractéristiques des éléments constitutifs de la structure d'un bâtiment existant sans nuire à l'intégrité structurelle ?
- Comment peut-on déterminer la capacité portante de la structure d'un bâtiment en cours d'exécution ?
- Comment améliorer la capacité portante de la structure d'un bâtiment existant ?

0.4. Formulation des hypothèses

Comme hypothèse nous proposons les réponses suivantes :

- Pour déterminer les caractéristiques des éléments constitutifs d'un bâtiment en cours d'exécution sans nuire à son intégralité structurelle, l'on pourrait recourir à l'usage des techniques non destructives des vérifications des éléments déjà construit.
- Après détermination des caractéristiques de ces éléments constitutifs, la capacité portante d'une structure se déterminerait en le modélisant dans un logiciel à l'instar de Robot Structural Analysis et en réalisant des simulations sur le modèle conçu.
- La méthode de renforcement par chemisages en béton armé pourrait nous permettre d'augmenter la capacité portante de la structure d'un bâtiment existant.

0.5. Justification du choix du sujet et motivations

Notre étude s'inscrit dans une démarche visant à mieux orienter une pratique de plus en plus observée dans la ville de Goma, où certains maîtres d'ouvrage imposent la surélévation des bâtiments au-delà des niveaux initialement prévus lors de la conception, souvent sans vérification préalable de la capacité portante de la structure existante. Cette situation pose d'importants problèmes de sécurité et met en évidence la nécessité d'analyses structurelles rigoureuses avant toute extension en hauteur.

En nous penchant sur l'analyse et le renforcement structurel d'un bâtiment existant, nous explorons une alternative stratégique à la démolition-reconstruction qui est souvent très coûteuse.

La motivation de ce travail réside également dans l'intérêt académique et professionnel qu'il présente, en offrant l'opportunité d'appliquer les connaissances théoriques du génie civil à un cas réel rencontré à Goma, tout en contribuant à la promotion de pratiques constructives plus sûres et responsables.

0.6. Énoncé des objectifs de recherche

0.6.1. L'objectif général

L'objectif principale de ce travail est d'analyser la structure d'un bâtiment en cours d'exécution afin de vérifier sa capacité portante en vue d'une extension verticale, et proposer des solutions de renforcement adaptées si nécessaire.

0.6.2. Les objectifs opérationnels/spécifiques

Les objectifs spécifiques de ce travail sont :

- Identifier les caractéristiques des matériaux constitutifs du bâtiment existant sans nuire à leurs intégralités.
- Évaluer la capacité portante de la structure existante face aux charges induites par l'ajout des niveaux supplémentaires.
- Proposer des techniques de renforcement structurel appropriées pour permettre une extension en hauteur tout en garantissant la sécurité et la stabilité du bâtiment

0.7. Méthodologie et délimitation du travail

La méthodologie de l'étude comprend les étapes suivantes :

- Une revue de la littérature afin de cerner les concepts clés liées à l'analyse et au renforcement des structures existantes.
- Une phase de collecte des données, visant à établir un diagnostic précis de l'état structurel du bâtiment étudié et obtenir les informations nécessaires à la modélisation
- Des simulations numériques tenant compte des données recueillies, dans le but d'évaluer le comportement de la structure.
- Une Analyse les résultats obtenus afin de propose un renforcement adapté

Cette étude se limite à l'analyse statique du comportement des poteaux. Bien que la surélévation influence également les fondations, l'analyse de ces dernières a été omis dans le cadre de la présente étude.

0.8. Structure du mémoire/ Subdivision du travail

Dans le cadre de cette étude, notre travail est structuré en trois chapitres principaux, en plus de l'Introduction Générale et la Conclusion Générale, afin de présenter de manière cohérente différentes étapes de notre démarche scientifique et technique.

- Le Chapitre premier portant sur les généralités des méthodes des diagnostics des éléments déjà construits ainsi que sur les techniques des renforcements des structures en Béton armés.
- Le Chapitre deuxième s'intéressant à la méthodologie du travail et aux outils de recherches.
- Le Chapitre troisième consistant à la présentation et l'interprétation des différents résultats.

Chapitre 1. GENERALITES SUR LES METHODES DE DIAGNOSTIQUES ET RENFORCEMENT STRUCTURELLES.

1.1 INTRODUCTION PARTIELLE

L'analyse et le renforcement structurel des ouvrages en béton armé constituent une préoccupation majeure dans le domaine du génie civil, surtout dans un contexte où la durabilité, la sécurité et l'optimisation de l'espace bâti sont devenues incontournables. En effet, face à la pression foncière et à la croissance démographique rapide observées dans plusieurs villes africaines, l'extension en hauteur des bâtiments apparaît comme une solution viable permettant de répondre aux besoins croissants en infrastructures sans recourir à la démolition-reconstruction, souvent coûteuse et chronophage [1].

Cependant, une telle opération exige une évaluation rigoureuse de l'état de la structure existante, afin de s'assurer de sa capacité portante et de sa stabilité face aux nouvelles charges induites. Le recours à des méthodes d'analyse fiables et à des techniques de renforcement adaptées s'avère donc indispensable pour garantir la sécurité des usagers et la durabilité des ouvrages [3].

Ce premier chapitre est consacré aux notions générales relatives au diagnostic et au renforcement des structures existantes en béton armé. Il vise à fournir le cadre conceptuel et technique nécessaire à la compréhension du reste de ce travail.

Dans un premier temps, il présente les définitions et terminologies fondamentales liées à l'analyse structurelle, au diagnostic et aux techniques de renforcement. Ensuite, il expose les différentes méthodes de diagnostic des éléments déjà construits. Enfin, ce chapitre offre un aperçu des principales techniques de renforcement structurel.

1.2 THERMINOLOGIE

- Analyse structurelle : C'est un processus consistant à évaluer la capacité d'une structure (à l'aide des calculs sur de modèles dans des logiciels spécialisés) à résister aux charges et contraintes auxquelles elle sera soumise.
- Diagnostique structurelle : Le diagnostic d'un ouvrage est l'étape qui permet avant tout de se prononcer sur son état de santé et de voir quelles sont les éventuelles pathologies ainsi que leur ampleur [4].
- Renforcement : Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service ou performance mécanique d'une construction (ductilité, résistance...) [5].
- Extension en hauteur ou surélévation : C'est l'ajout de nouveaux étages à une construction
- Capacité portante : Elle désigne la charge maximale qu'un élément peut supporter sans rupture ou tassements excessifs.
- Intégralité structurelle : C'est la capacité d'une structure à rester stable et solidaire dans son ensemble face aux charges et aux agressions.
- Modélisation : C'est la représentation numérique d'une structurel.
- Simulation : C'est l'application des charges réelles ou hypothétiques sur un modelé numérique pour observer la réaction de la structure.
- Chemisage : Le chemisage est une méthode traditionnelle et l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour renforcer ou réparer les éléments en béton armé. Cette technique implique une augmentation des sections du béton existant en rajoutant plus de béton armé ou d'acier. La section supplémentaire permet aux éléments structurels de transférer plus de charge tout en offrant la ductilité, la résistance et la stabilité manquantes [6].

1.3 CLASSIFICATION DES METHODES DE DIAGNOSTICS DES ELEMENTS DEJA CONSTRUITS

Le diagnostic d'un ouvrage consiste à évaluer l'état de dégradation et de résistances des éléments les constituants. Pour y parvenir on peut recourir à des méthodes non destructives sinon à des méthodes destructives.

1.3.1 Méthodes non destructives

Voici quelques méthodes de diagnostic non destructive.

1.3.1.1 Examen visuel

Le principe du diagnostic visuel est d'aller sur le site et de répertorier les différents défauts que présentent les structures. Ces défauts, pour les ouvrages en béton armé peuvent être très nombreux.

Les principales anomalies qu'on observe sont :

- Les fissures avec leur ouverture et leur longueur.
- Les zones humides ainsi que les zones de mousses ou de végétation.
- Les zones de faïençage.
- Les éclats de béton en formation ou profonds ainsi que la présence d'aciers apparents.
- Etc.

Tous ces éléments doivent être répertoriés sur des plans, accompagnés d'un reportage photographique des principaux désordres. Cette étape permet de définir la gravité des troubles mais aussi de savoir avec quel essais on pourra poursuivre pour une meilleure analyse [1].

1.3.1.2 Auscultation sonique

L'auscultation sonique est une méthode utilisée pour caractériser la qualité du béton. Le principe de l'essai repose sur la mesure de la vitesse de propagation du son dans le matériau. On mesure la propagation d'une première impulsion d'un train d'ondes généré par un transducteur, entre deux points déterminés du béton. On peut, à partir du temps de propagation mesuré, exprimer une vitesse conventionnelle de propagation : c'est le quotient de la distance entre les deux transducteurs par le temps mesuré.

En effet, la vitesse de propagation du son est moindre dans le vide. Si le béton est poreux, fissuré ou de mauvaise qualité, il y aura plus d'air dans le matériau. Ainsi la vitesse de propagation mesurée sera plus faible [1].



Figure 1-1 : Essai avec ausculteur sonique [1]

1.3.1.3 Essai au scléromètre

Le principe de l'essai sclérotique repose sur la corrélation entre la dureté d'un matériau et sa résistance à la compression. Pour déterminer la dureté du béton, une bille d'acier est projetée sur une sonde en contact avec l'ouvrage à inspecter. Lors de son rebond, la bille entraîne un index coulissant sur une règle de mesure. Plus le rebond sera important, plus le matériau sera dur. Pour définir la résistance du béton, on se refait alors une courbe étalonnée grâce à l'indice de rebond indiqué par les scléromètres.



Figure 1-2 : Essai au scléromètre

1.3.1.4 Détections des armatures [3]

Elle se fait par effets magnétiques ou électromagnétiques grâce à des appareils appropriés. Cependant la profondeur d'investigation reste limitée à une dizaine de centimètres. Voici quelques appareils détecteurs

- Le pachomètre :

Elle sert à déterminer la position des armatures dans le béton



Figure 1-3 : Pachnometre

➤ Le profomètre :

Il est utilisé pour la détermination précise de la position et du diamètre des armatures dans le béton.



Figure 1-4 : Profomètre

➤ Le corrossimètre :

Employé dans le but de détecter la corrosion des armatures, d'ouvrages en béton avant l'apparition des dommages visibles, en mesurant le potentiel de surface du béton.



Figure 1-5 : Corrossimetre

1.3.2 Méthodes destructives [1]

Ces méthodes sont plus précises en termes de résultat d'analyse mais restent moins intéressante car elles impliquent de nuire à l'intégralité structurelle de l'ouvrage à diagnostiquer. Parmi elles, nous pouvons citer :

➤ Le test à la carbonatation :

Elle consiste à pulvériser un colorant sensible au pH (solution de phénolphthaléine) sur une coupe fraîche de béton. La partie non colorée indiquant la zone carbonatée ($\text{pH} < 9$). Ceci a pour effet de diminuer voire de supprimer l'effet de passivation de l'acier qui lui assurait une protection naturelle contre la corrosion.

➤ Le carottage :

On y a recours principalement pour effectuer des essais de résistance à la compression sur les carottes prélevées, afin de déterminer les caractéristiques mécaniques des éléments mais Il est aussi possible d'analyser chimiquement le prélèvement afin de connaître les constituants du béton tels que le type de ciment utilisé, le rapport E/C estimé, la taille des granulats.

➤ Le prélèvement de l'acier :

Il permet de déterminer le type d'acier (HA, lisse, TOR, etc.) ainsi que leurs caractéristiques mécaniques telles que la limite d'élasticité.

1.4 APPERCUE SUR LES TECHNIQUES DES RENFORCEMENTS

Après examen visuel, après différents essais de techniques des diagnostiques et après évaluations de la capacité portante de la structure ;

Soit l'on peut recommander une démolition dans le cas où la structures est ruinée ; soit on peut prescrire un traitement qui peut consister en un renforcement en vue d'avoir une résistance adéquate et prolonger la vie de l'ouvrage.

Un renforcement peut donc être nécessaire si la charge portée par la structure augmente : soit en raison d'ajout d'étage, soit en raison du changement d'usage, soit en raison d'augmentation d'activité, soit en raison de défauts dans l'exécution, soit en raison de la perte de résistance à la compression du BA, soit en raison de flambement des poteaux ; soit en raison d'un tassement dans les fondations soit en raison de dégât dans la structure (d'incendie, accidents, etc) [1].

Les types de renforcement les plus répandus sont :

- Le chemisage en béton armé,
- Le chemisage par des matériaux composites,
- Le chemisage en acier.

1.4.1 Renforcement en béton armé

Le chemisage en béton armé consiste en une addition d'une couche épaisse du béton armé autour de la colonne afin d'apporter plus de résistance à la flexion ductilité et résistance au cisaillement de cet élément de structure. Cette technique est plus utilisée dans le renforcement des poteaux de bâtiments que dans les piles de ponts.

Cette méthode est peu couteuse et ne demande pas une main d'œuvre professionnelle.

Néanmoins, ça augmente le poids de la structure, ça demande un coffrage, sa mise en œuvre est difficile et la durée des travaux est plus longue et donc un dérangement des occupants de l'ouvrage.

Ce type de chemisage exige une rugosité de l'interface par décaissement dans le béton pour avoir une amélioration de la transmission des efforts. La surface doit être traitée par la suite avec une couche primaire de résine. Ensuite, on met en place les armatures puis le coffrage et on passe au coulage en dernier lieu [6].

Grâce à sa rentabilité, le chemisage en béton armé est la méthode la plus choisie dans un renforcement sismique des éléments. En plus, chaque ingénieur est familier avec l'application du béton, il est le plus courant. Ensuite, le chemisage en béton armé est la technique la plus convenable sur un élément endommagé. En outre, les bétons sont versatiles et s'adaptent à presque toutes les formes.

Finalement, en utilisant le chemisage en béton, on peut améliorer la raideur, la résistance au cisaillement, la capacité de déformation élastique, la continuité des éléments, le moment résistant, et la résistance à la flexion (section de l'élément augmente).

Mais, il ne faut pas oublier que cette technique induit à un désavantage en ce qui concerne l'espace, vu que les dimensions vont augmenter. De plus, lors de la mise en place d'un tel type de chemisage, le poids de la structure augmente, les travaux sont assez longs et une grande perturbation aura lieu : un grand amont de poussière, débris et pollution se créent [1].



Figure 1-6 Chemisage d'un poteau

1.4.2 Renforcement en acier

L'association des profilés métalliques aux structures en béton armé permet d'augmenter la capacité portante de la structure. La réalisation ainsi d'une structure mixte acier-béton dont il faut assurer la compatibilité entre ces deux matériaux est indispensable et nécessaire.

Cette compatibilité entre les deux matériaux est liée directement à la qualité de l'interface (acier-béton) pour bien transmettre les efforts internes.

L'intérêt de cette méthode est la rapidité de réalisation in-situ, les pièces métalliques sont préfabriquées en atelier, et leur montage s'effectue à l'aide de cheville ou tiges ancrées.

L'assemblage sur site des éléments décomposés en tronçons facilite ainsi leur transport et mise en place.

L'inconvénient majeur de cette méthode de renforcement tient à la précision qui est requise lors du mesurage de la structure existante, si les éléments fournis se positionnent correctement au montage. Il est recommandé d'envisager des possibilités d'ajustement et de positionnement des pièces métalliques pré-forées vis-à-vis de forages dans le béton, lors du montage, contrairement aux constructions métalliques nouvelles [7].



Figure 1-7 Chemisage en acier d'un poteau [1]

1.4.3 Renforcement par matériaux composites

Un matériau composite est l'assemblage de deux matériaux de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Les matériaux composites sont composés de fibres noyées dans une matrice.

Une fibre est constituée de plusieurs filaments, élémentaires dont le diamètre est de l'ordre de 5µm. La fibre a un comportement élastique linéaire jusqu'à rupture les lois de comportement sont de type "élastique fragile".

Le comportement mécanique des matériaux composite dépend du type de fibres et de type des matrices, qui doivent être compatibles entre eux.

La matrice est le matériau qui donne le monolithisme à l'ensemble, et permet d'assurer le collage des fibres entre elles et transférer les efforts extérieurs à celles-ci.

De plus la matrice joue un rôle très important pour résister aux efforts tranchants. Par ailleurs elle protège les fibres en les isolant de l'humidité de l'oxydation et des agents agressifs chimiques [7].

Les avantages du renfort au moyen de matériaux composites offrent :

- une légèreté 5 fois plus que l'acier.
- une résistance 10 fois plus optimale que les platines.
- une grande flexibilité avec une faible épaisseur.
- une facilité de transport
- un poids de l'ordre de 800gr le mètre carré (épaisseur d'environ 1mm)
- une mise en place et un découpage à la forme désirée
- une mise en œuvre aisée
- adaptation aux supports
- Non sensibilité à la corrosion et d'autres attaques chimiques
- Meilleure résistance au feu et à la fatigue



Figure 1-8 Chemisage en fibre d'un poteau

1.4.4 Autres techniques des renforcements

1.4.4.1 Renforcement par précontraintes externes

Une nouvelle technique consiste à entourer la colonne circulaire par des bandes, composées de torons en acier avec un élément d'ancrage, donnant une précontrainte additionnelle qui assure une armature supplémentaire avec une pression latérale active.

En ce qui concerne les colonnes carrées, la précontrainte externe est produite par des disques de concentration des contraintes. Une pièce d'appoint supplémentaire est nécessaire pour assurer une pression uniforme sur toute la section [6].



Figure 1-9 Renforcement d'un poteau carre par précontrainte externe.

1.4.4.2 Renforcement par ajout de voile

Pour améliorer le comportement d'une structure, l'une des solutions qui a été la plus usitée par les bureaux d'études est celle de l'ajout de voiles de contreventement. Leur introduction a pour visée d'empêcher un effondrement d'ensemble en château de cartes. La proposition portant principalement sur des rajouts de voiles en façades de structures contreventées en portiques. L'objectif étant de ne pas modifier la distribution architecturale à l'intérieur des appartements. Toutefois, pour augmenter la rigidité des éléments structuraux, ou réparer des ensembles de poteaux de niveaux fortement touchés, cette condition n'a pas pu être respectée et des travaux de confortement importants ont été entrepris avec des réaménagements internes rendus obligatoires.

Une attention particulière doit être accordée à la liaison du voile avec le poteau repris, en s'assurant de la continuité des barres horizontales par un ancrage dans la masse de ce dernier et de la bonne transmission des efforts entre niveaux consécutifs par des dispositions de ferrailage adaptées [5].



Figure 1-10 Renforcement en béton armé par voiles de contreventement.

1.5 CONCLUSION PARTIELLE

Le choix des techniques de renforcement s'effectue selon les critères habituels : coût, rapidité de mise en œuvre, durabilité, réversibilité (possibilité de retour ultérieur en arrière, ce qui est parfois demandé pour les monuments historiques), disponibilité, compétence des entreprises locales, etc. Les solutions techniques retenues doivent également tenir compte d'un éventuel impératif de non-interruption de l'exploitation du bâtiment. En effet, cette exigence est très fréquente [5].

En somme, ce premier chapitre a permis de clarifier les concepts clés relatifs à l'analyse et au renforcement des structures en béton armé. Après avoir défini les principales terminologies, il a présenté les différentes méthodes de diagnostic utilisées pour évaluer l'état des ouvrages existants, en distinguant les approches non destructives, qui préservent l'intégrité de la structure, et les approches destructives, qui fournissent des résultats plus précis mais plus invasifs.

Par ailleurs, un aperçu des techniques de renforcement a montré la diversité des solutions envisageables qu'il s'agisse du chemisage en béton armé, en acier, par matériaux composites, ou encore d'approches complémentaires comme la précontrainte externe et l'ajout de voiles de contreventement.

Le choix de la méthode appropriée dépend de plusieurs critères, notamment le coût, la rapidité de mise en œuvre, la disponibilité des matériaux et des compétences, ainsi que les exigences de sécurité et de durabilité.

Cette synthèse fournit ainsi le socle théorique nécessaire pour aborder les étapes pratiques de ce travail, à savoir la méthodologie de collecte des données et l'évaluation des capacités portantes du bâtiment étudié, qui feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 2 METHODOLOGIE

2.1 INTRODUCTION PARTIELLE

L'étude du comportement structurel des bâtiments existants en vue d'une extension ou d'une réhabilitation nécessite une démarche méthodologique rigoureuse, fondée sur l'observation, la mesure et l'analyse scientifique. La fiabilité d'un projet de renforcement dépend étroitement de la précision des diagnostics réalisés et de la pertinence des méthodes utilisées pour évaluer la capacité portante de la structure. En effet, une approche empirique ou approximative peut conduire à des erreurs de conception graves, compromettant la stabilité de l'ouvrage et la sécurité des usagers. C'est pourquoi il est essentiel d'adopter une méthodologie conforme aux normes de calcul modernes, permettant de combiner l'analyse expérimentale et la modélisation numérique [1].

Par ailleurs, la méthodologie en ingénierie structurelle ne se limite pas à la collecte des données : elle s'inscrit dans une logique d'interprétation, de comparaison et de validation des résultats. Elle permet d'établir une cohérence entre la réalité physique de l'ouvrage et sa représentation numérique [4].

Ce chapitre présente la démarche méthodologique adoptée pour atteindre les objectifs fixés dans cette étude portant sur l'analyse et le renforcement structurel d'un bâtiment en cours d'exécution à Goma en vue d'une extension en hauteur. Il expose les différentes étapes à suivre, les outils à utiliser ainsi que les procédés envisageables pour le diagnostic et la proposition des solutions de renforcement. L'objectif principal de cette démarche est d'assurer une évaluation rigoureuse de la structure existante, en combinant des observations sur le terrain, des essais de caractérisation des matériaux, des modélisations numériques et une proposition de méthode de renforcement appropriée.

2.2 CHOIX DES METHODES

La réussite d'une étude de renforcement structurel repose en grande partie sur la pertinence des méthodes utilisées pour le diagnostic et sur la cohérence du procédé de renforcement choisi. Le choix méthodologique doit permettre à la fois de caractériser l'état réel des matériaux, d'évaluer la capacité portante de la structure existante et de garantir la sécurité de l'ouvrage après intervention [3].

Dans le cadre de ce travail, deux grands volets méthodologiques ont été distingués : le diagnostic structurel et la proposition du renforcement.

2.2.1 Diagnostic de la structure existante

Le diagnostic vise à évaluer l'état général du bâtiment avant toute opération de modélisation ou de renforcement. Il s'est appuyé sur 4 principales approches complémentaires :

2.2.1.1 Analyse visuelle de l'état général de la structure

L'analyse visuelle constitue la première étape du diagnostic et permet d'identifier les dégradations apparentes telles que les fissures, les éclats de béton, les zones humides ou corrodées, et tout autre indice de défaillance structurale. Cette étape permet non seulement de repérer les zones critiques nécessitant un examen approfondi, mais aussi de comprendre les causes probables des désordres observés (vieillesse, surcharges, défauts d'exécution, etc.) [1].

Dans le cadre de notre thématique, les observations ont été effectuées surtout sur les poteaux, et les fondations accessibles, et consignées sous forme de croquis et de photos commentées.

2.2.1.2 Diagnostique de fondations

Lors du diagnostic d'un ouvrage, les fondations ne sont ni visibles ni accessibles. Seules sont visibles les effets de désordres touchant les fondations (fissures, tassements, etc.)

Ainsi les démarches diagnostiques applicable aux désordres lies aux fondations peuvent être les suivantes :

- L'étude bibliographique sur l'ouvrage existant, c'est- à dire étude des plans de coffrage et des plans des armatures existantes.
- La réalisation de puits de reconnaissance permettant de reconstituer la géométrie des fondations existantes : largeur, profondeur et débord des semelles ; nombre, diamètre et tête des pieux.
- La reconnaissance de sol et réalisation de sondages [1].

A notre niveau, l'études bibliographique saveur être l'option la plus abordable.

2.2.1.3 Mesure de la résistance du béton au moyen du scléromètre

Pour déterminer la résistance mécanique du béton sans recourir à des essais destructifs, des mesures peuvent être effectuées à l'aide d'un scléromètre, aussi appelé marteau de Schmidt. Cet appareil permet d'évaluer la dureté de surface du béton et d'en déduire sa résistance à la compression à partir des courbes d'étalonnage normalisées.

L'essai sclérométrique est l'une des méthodes non destructives les plus fiables et les plus utilisées pour le diagnostic des structures en béton armé, car il offre un bon compromis entre rapidité, coût et précision [8].

Les mesures peuvent être réalisées à l'emplacement des plusieurs poteaux (éléments de la structure qui concernent notre étude), afin d'obtenir une moyenne représentative du béton en place. Ces valeurs servent de base à la modélisation structurelle.

2.2.1.4 Analyse des plans de ferrailage pour la détermination des armatures existantes

L'analyse des plans de ferrailage d'origine permet d'identifier le type, le diamètre et la disposition des armatures utilisées lors de la construction initiale du bâtiment. Cette étape est essentielle pour vérifier la cohérence entre la conception et la structure effectivement construite.

La connaissance exacte des dispositions d'armatures est une condition préalable indispensable à toute simulation numérique fiable. En effet, la résistance, la ductilité et le comportement global d'un bâtiment dépendent directement de la qualité et de la distribution des aciers dans les éléments porteurs [4].

Les données issues des plans devront être croisées avec des relevés in situ afin de s'assurer de la correspondance entre les documents techniques et la réalité du chantier.

2.2.2 Méthode de renforcement retenue

Après analyse du comportement de la structure existante et des contraintes liées à son environnement, le chemisage en béton armé peut être retenu comme méthode de renforcement. Ce choix repose sur plusieurs considérations techniques, économiques et pratiques.

En effet le chemisage en béton armé consiste à augmenter la section des éléments porteurs (poteaux, poutres ou voiles) en y ajoutant une nouvelle couche de béton armé, solidaire de la structure existante. Ce procédé améliore la résistance à la compression, au cisaillement et à la flexion, tout en augmentant la ductilité et la rigidité des éléments [5].

Les avantages de cette méthode sont multiples :

- **Disponibilité des matériaux** : le béton et les aciers d'armature sont facilement accessibles localement ;
- **Simplicité de mise en œuvre** : la technique ne requiert pas d'équipements sophistiqués et peut être réalisée avec la main-d'œuvre locale ;
- **Efficacité structurelle** : elle permet de restaurer la portance d'éléments endommagés et de supporter les charges induites par de nouveaux niveaux ;
- **Adaptation aux conditions sismiques** : le chemisage améliore la ductilité globale de la structure et sa résistance aux sollicitations dynamiques [3].

Cependant, cette technique présente aussi quelques inconvénients, notamment l'augmentation du poids propre de la structure et le temps d'exécution plus long. Ces limites restent néanmoins acceptables dans le cadre du présent projet, compte tenu de la nécessité de renforcer durablement le bâtiment avant l'extension en hauteur.

En définitive, le choix du chemisage en béton armé s'explique par son efficacité prouvée, son adaptabilité aux conditions locales et son adéquation avec les objectifs du projet.

2.3 RECOLTE DE DONNES

La collecte des données constitue une étape essentielle dans toute étude de diagnostic et d'analyse structurelle. Elle permet de rassembler les informations nécessaires à la compréhension du comportement réel de la structure et à la vérification de sa conformité aux hypothèses de conception. La qualité des résultats d'une étude structurelle dépend en grande partie de la fiabilité et de la précision des données de base utilisées [3].

Dans le cadre de cette étude, la collecte des données a pour but de réunir toutes les informations techniques permettant d'évaluer la capacité portante de l'ouvrage et de préparer la modélisation numérique.

Elle s'est appuyée sur trois sources principales :

- Les **observations directes sur le terrain**, destinées à apprécier l'état général du bâtiment et à identifier les éventuelles dégradations visibles ;
- Les **mesures issues des essais non destructifs**, notamment les résultats du scléromètre, utilisés pour estimer la résistance du béton en place (Faute d'accès aux matériels, nous avons dû recourir au hypothèse ;
- Et enfin, **l'analyse des plans de ferrailage et des relevés géométriques**, permettant de déterminer les dimensions réelles et la disposition des armatures dans les éléments porteurs.

Ces différentes données, une fois vérifiées et croisées, peuvent servir de base à la modélisation de la structure dans le logiciel Autodesk Robot Structural Analysis Professional, en vue de simuler son comportement sous charges et d'identifier les besoins réels en renforcement.

2.3.1 Observation directe

L'observation directe constitue la première étape du processus de collecte des données et du diagnostic structurel. Elle vise à examiner sur le terrain l'état général du bâtiment afin d'identifier les signes visibles de dégradation, de vieillissement ou de défaillance structurelle. Cette phase d'investigation visuelle permet d'obtenir une première appréciation qualitative de la structure avant toute mesure instrumentale. Elle oriente le choix des zones à tester et aide à formuler les hypothèses de comportement de l'ouvrage [1].

Ainsi, l'observation directe de l'ouvrage en exécution consistera à inspecter minutieusement les poteaux, les poutres, les dalles et les murs porteurs, dans le but de repérer les anomalies apparentes telles que les fissures, les éclats de béton, les traces d'humidité, la corrosion des armatures ou encore les tassements différentiels. Ces constats préliminaires servent de base pour planifier les essais non destructifs et pour évaluer la gravité potentielle des désordres observés.

2.3.2 Analyse des données obtenus grâce aux scléromètres

L'essai au scléromètre constitue l'une des méthodes non destructives les plus utilisées pour évaluer la résistance du béton en place. Il permet d'obtenir, sans endommager la structure, une estimation fiable de la résistance à la compression du béton, paramètre fondamental pour l'analyse de la capacité portante de l'ouvrage.

Le principe de cet essai repose sur la corrélation entre la dureté du béton et sa résistance mécanique : une bille d'acier est projetée sur un piston en contact avec la surface du béton, et la hauteur du rebond mesurée indique la dureté du matériau. Plus l'indice de rebond est élevé, plus la résistance du béton est importante [1].

Dans le cadre de la présente étude, plusieurs points de mesure doivent être choisis sur les poteaux du bâtiment afin de garantir une représentativité des résultats.

Les valeurs d'indice de rebond obtenues peuvent ensuite être converties en résistance à la compression à l'aide des courbes d'étalonnage normalisées. Ces résultats permettent de :

- Vérifier la conformité du béton par rapport aux exigences normatives ;
- Identifier les zones présentant une résistance insuffisante ;
- Fournir des données précises pour la modélisation numérique dans Robot Structural Analysis.

La fiabilité d'une analyse structurelle dépend de la qualité des données d'entrée, notamment celles issues des essais in situ [3]. Ainsi, les valeurs sclérométriques constituent un élément déterminant dans la validation du modèle de calcul et dans le choix du procédé de renforcement le plus adapté.

2.3.3 Analyse de plan de ferrailage

L'analyse des plans de ferrailage et la réalisation de relevés géométriques constituent une étape cruciale dans la compréhension du comportement structurel d'un bâtiment existant. Ces informations permettent de reconstituer fidèlement la configuration des éléments porteurs et de vérifier la cohérence entre la conception initiale et la structure réellement exécutée sur le terrain.

La fiabilité d'une modélisation structurelle dépend directement de la précision des données géométriques et des détails d'armatures. En effet, la résistance d'une structure en béton armé n'est pas uniquement liée à la qualité du béton, mais aussi à la disposition, au diamètre et à l'ancrage des aciers de ferrailage. Une mauvaise connaissance de ces paramètres peut entraîner une sous-estimation ou une surestimation de la capacité portante globale de l'ouvrage [4].

Dans le cadre de cette étude, les plans de ferrailage d'origine peuvent être exploités pour :

- Identifier les sections, espacements et diamètres des armatures utilisées dans les poteaux et les semelles des fondations ;
- Vérifier la conformité des dispositions constructives avec les recommandations des normes en vigueur (BAEL 91) ;
- Comparer les dispositions théoriques aux données relevées sur site afin de déceler d'éventuelles divergences liées à l'exécution.

Les relevés géométriques peuvent être réalisés parallèlement à cette analyse afin de déterminer les dimensions réelles des éléments porteurs (hauteurs d'étages, sections des poteaux et poutres, etc.).

Les données issues de cette étape permettent de construire un modèle numérique réaliste du bâtiment dans le logiciel Robot Structural Analysis, en intégrant fidèlement la géométrie et les caractéristiques structurelles du bâtiment.

2.4 PROCEDE DU CHEMISAGE EN BETON ARMEE

Dans le cas où le diagnostic de la structure a révélé que certains éléments porteurs présentent une résistance insuffisante pour supporter les charges supplémentaires liées à l'extension envisagée, il s'avère nécessaire de renforcer la structure afin d'augmenter sa capacité portante et d'assurer la sécurité de l'ouvrage. Parmi les différentes techniques de renforcement existantes, le **chemisage en béton armé** a été retenu comme la méthode la plus appropriée pour ce projet.

2.4.1 Principe du procédé

Le principe du chemisage repose sur la création d'une nouvelle enveloppe en béton armé autour de l'élément existant (poteau, poutre ou voile). Cette enveloppe, munie d'armatures supplémentaires, travaille conjointement avec la section initiale grâce à une liaison mécanique et chimique assurée par l'adhérence entre les deux bétons. La réussite du procédé dépend de la qualité de cette adhérence, qui doit être garantie par une préparation minutieuse de la surface et une exécution conforme aux règles de l'art [1]

2.4.2 Étapes du procédé (Mode opératoire : Cas d'un poteau) [8]

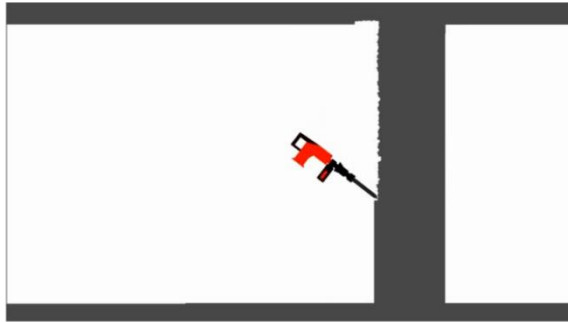
1. Réduire ou éliminer temporairement les charges sur les colonnes.

Cela se fait en plaçant des vérins mécaniques et des accessoires supplémentaires entre les étages.

2. Préparation de la surface du poteau

Il s'agit de faire le décapage du béton dégradé jusqu'à atteindre la partie saine ; ceci peut se faire avec un marteau à piquer.

L'Object est la création d'une rugosité pour favoriser l'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton.



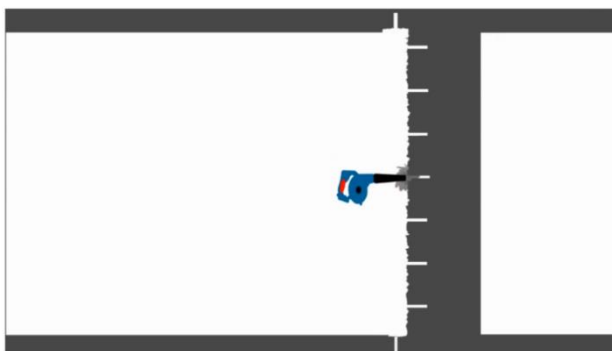
3. Percer des trous pour recevoir le connecteur en acier.

Ceci peut se faire à l'aide d'une foreuse a béton.



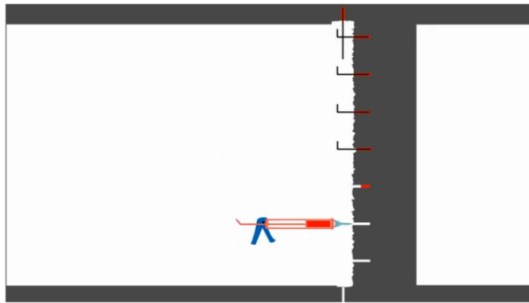
4. Nettoyage des trous percés

Il s'agit ici de faire le nettoyage complet de la surface pour éliminer les poussières, laitances et particules friables ; Elle peut se faire à l'état sec à l'aide brosse ronde puis en soufflant de l'air pour évacuer les poussières.



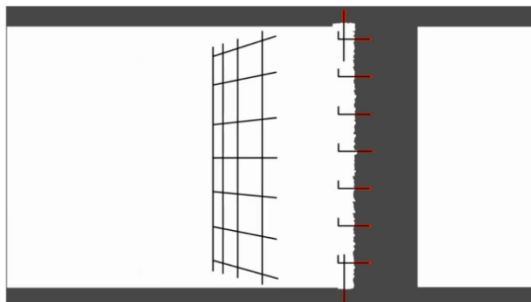
5. Remplir les trous avec un matériau époxy et insérer le connecteur acier

Il s'agit de préparer la liaison des nouvelles armatures à celles de la structure initiale par percement et scellement au mortier époxydique.



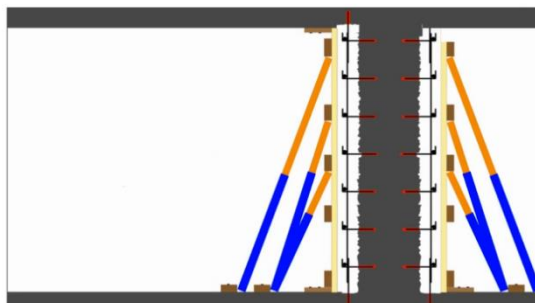
6. Installation des nouveaux armatures longitudinales et transversales

A ce niveau il s'agit d'ajouter les armatures longitudinales et transversales (cadres ou étriers) autour de l'élément existant, la section des armatures étant défini en fonction du nouveau dimensionnement.



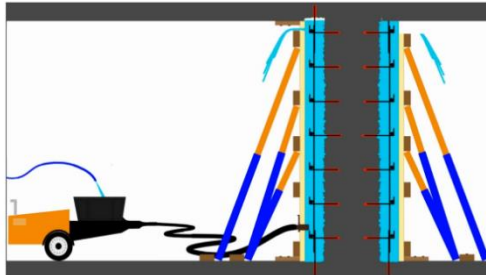
7. Installation et fixation du coffrage

Il s'agit de la réalisation du coffrage périphérique ;



8. Nettoyage humide avec la pression de l'eau.

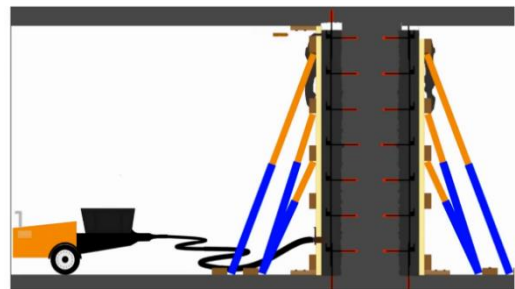
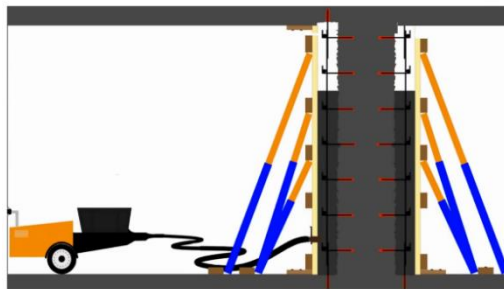
Après avoir percer un orifice dans la partie supérieure du coffrage pour expulser l'air elle se fait pour nettoyer les pores et saturer les surfaces préparées.



9. Pompage du béton.

Elle se poursuit jusqu'à ce que la cavité soit rempli.

Notons que le béton utilisé doit être à faible retrait et doit être fait de petits agrégats.



10. Le décoffrage.

Il est recommandé de le faire au moins 7 jours après la fin du pompage.



11. Verification

Après décoffrage un contrôle de la résistance du béton après durcissement pour valider la conformité du renforcement est recommandée

2.4.3 Disposition possible d'armature

La disposition des armatures constitue une étape déterminante dans la mise en œuvre du chemisage en béton armé, car elle conditionne directement l'efficacité du renforcement et le comportement mécanique de l'élément renforcé. Une organisation adéquate des armatures permet d'assurer une bonne transmission des efforts entre le béton existant et le béton ajouté, d'améliorer la résistance à la compression et au cisaillement, ainsi que d'augmenter la ductilité de l'élément renforcé [7].

Les schémas présentés ci-après illustrent différentes configurations d'armatures longitudinales et transversales pouvant être adoptées en fonction de la géométrie de l'élément à renforcer, des contraintes d'exécution sur chantier et du niveau de renforcement recherché, tout en respectant les règles de l'art et les prescriptions du béton armé définies par le BAEL 91 modifié 99

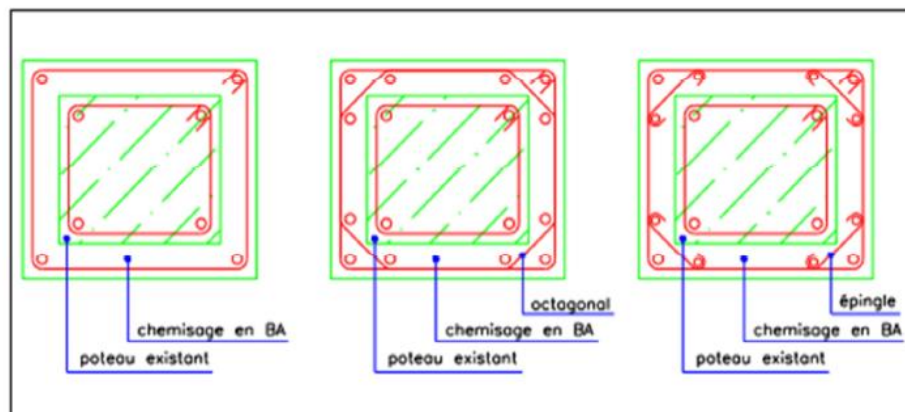


Figure 2-1 : Dispositions possibles d'armatures sur poteau [1].

Parfois, un chemisage sur les quatre cotés n'est pas faisable, dans ce cas, des armatures Horizontales sont soudées avec les anciennes.

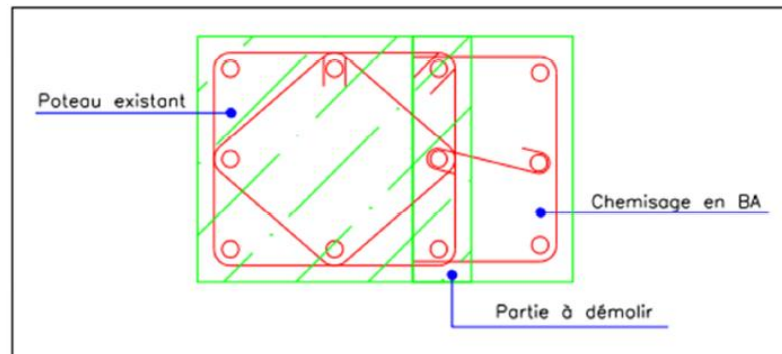


Figure 2-2 : Cas des armatures Horizontales soudées avec les anciennes un seul côté.

Pour les voiles de contreventement, on fait un chemisage sur les bords où ils se croisent des aciers scellés dans l'existant et des armatures en U sont placées et soudées aux aciers scellés. Le chemisage sur une seule face du voile est très efficace.

2.5 PRESENTATION DU LOGICIEL ROBOT [9]

Robot structural Analysis est un logiciel de modélisation et de calcul des structures par les éléments finis développé par Autodesk. Il est utilisé par les ingénieurs et les architectes pour analyser et dimensionner des structures en acier, en béton armé et en bois.

Le logiciel offre une large gamme de fonctionnalités notamment :

- Modélisation : Création de modèles 3D précis de structures complexes, y compris des poutres, poteaux, dalles, murs et des coques.
- Analyse : Calcul des charges et déformations des structures, y compris les analyses statiques, dynamiques et non linéaires
- Dimensionnement : Vérification de la résistance des structures aux charges appliquées selon les normes et codes de constructions en vigueur.
- Optimisation : Proposition des solutions pour améliorer la performance et la rentabilité des structures.
- Interopérabilité : Collaboration avec d'autres logiciels de conceptions de construction tels que Revit et AutoCAD.

2.6 CADRE DE VERIFICATION REGLEMENTAIRE.

L'analyse structurelle du bâtiment étudié a été conduite selon les principes de calcul aux états limites définis par la norme **BAEL 91 modifié 99**, qui constitue une de références normatives pour le dimensionnement et la vérification des structures en béton armé. Cette approche vise à garantir à la fois la sécurité de la structure face aux situations extrêmes et son bon comportement en phase d'exploitation [2].

Les actions appliquées à la structure ont été classées en charges permanentes et charges d'exploitation. À partir de ces actions, les efforts internes ont été déterminés par des simulations numériques réalisée à l'aide du logiciel Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Une attention particulière a été portée aux poteaux des niveaux inférieurs, considérés comme éléments critiques en raison de l'accumulation des charges verticales transmises par les étages supérieurs.

La vérification de la structure à l'État Limite Ultime (ELU) a été effectuée en comparant les sollicitations de calcul issues des combinaisons d'actions les plus défavorables aux résistances ultimes des sections en béton armé.

Le critère de sécurité adopté repose sur le **rapport Rd/Sd** , où Rd représente la résistance de calcul de l'élément et Sd l'effort de calcul appliqué. Une valeur de ce rapport supérieure à l'unité traduit une sécurité suffisante, tandis qu'un rapport inférieur à 1 met en évidence une insuffisance de capacité portante nécessitant une intervention de renforcement.

En complément, la vérification à l'**État Limite de Service (ELS)** a pour objectif de s'assurer que les déformations et les niveaux de sollicitations sous charges de service restent compatibles avec les exigences de durabilité, de fissuration admissible et de confort d'utilisation. Bien que l'analyse soit principalement axée sur l'ELU, la prise en compte de l'ELS permet de garantir un comportement satisfaisant de la structure dans des conditions normales d'exploitation. [2]

2.7 CONCLUSION PARTIELLE

En somme, la méthodologie adoptée dans le cadre de cette étude permet de définir une démarche scientifique rigoureuse, visant à évaluer de manière fiable la capacité portante d'une structure en vue de son extension en hauteur. Elle s'est articulée autour de deux axes principaux : le diagnostic et l'analyse de la structure suivie de la proposition d'une solution de renforcement adaptée.

Le diagnostic a combiné plusieurs approches complémentaires : l'observation directe pour l'évaluation visuelle de l'état général du bâtiment, l'essai au scléromètre pour la détermination de la résistance du béton en place, et l'analyse des plans de ferrailage pour identifier la disposition et les dimensions des armatures. Ces données, croisées avec les relevés géométriques, ont servi de base à la modélisation numérique réalisée dans Robot Structural Analysis.

L'analyse des résultats obtenus a conduit au choix du chemisage en béton armé comme procédé de renforcement le plus approprié. Ce choix s'explique par son efficacité éprouvée, sa facilité de mise en œuvre et la disponibilité des matériaux sur le marché local. De plus, cette technique offre une amélioration notable de la résistance mécanique et de la rigidité des éléments, garantissant ainsi la stabilité de la structure après extension.

Ainsi, la démarche méthodologique suivie assure la cohérence entre le diagnostic, la modélisation et la solution de renforcement proposée. Elle constitue le fondement sur lequel repose l'analyse des résultats et la conception des nouveaux plans de ferrailage, qui seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 PRESENTATION DES RESULTATS

3.1 INTRODUCTION PARTIELLE

Ce chapitre est consacré à l'exploitation et à l'interprétation des résultats obtenus. Il vise à évaluer le comportement réel de la structure étudiée face aux charges prévues initialement et à celles induites par la surélévation envisagée du bâtiment, imposée au-delà des niveaux définis lors de la conception initiale.

Les résultats présentés proviennent principalement de l'exploitation des données issues du diagnostic de la structure et de la modélisation numérique réalisée à l'aide du logiciel Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Leur analyse permet d'identifier les insuffisances structurelles éventuelles et de justifier techniquement les solutions de renforcement proposées.

Ainsi, Le présent chapitre consacré à la présentation, à l'analyse et à l'interprétation des résultats, constitue l'aboutissement de la démarche méthodologique exposée au chapitre précédent et vise à évaluer de manière objective la capacité portante de la structure existante en vue d'une extension en hauteur.

Elle constitue une transition essentielle entre l'approche méthodologique et les propositions de solutions de renforcement visant à assurer la sécurité, la durabilité et la fiabilité de l'ouvrage étudié.

3.2 PRESENTATION DE L'OUVRAGE

L'ouvrage faisant l'objet de la présente étude est un bâtiment en construction situé dans la ville de Goma vers CCLK. Il s'agit d'un bâtiment qui sera à usage d'habitation, constitué d'une structure porteuse en béton armé, initialement conçu pour 4 niveaux (R+3).



Figure 3-1 Rendu de l'immeuble Guillain Appartement tel que conçu initialement.

La structure est principalement composée de poteaux rectangulaires, de poutres en béton armé et de dalles pleines. Les dimensions géométriques, ainsi que les dispositions constructives ont été relevées à partir des plans d'exécution disponibles et complétées par des observations directes sur le terrain.

L'objectif de l'analyse est de vérifier si cette structure peut supporter l'ajout de niveaux supplémentaires, compte tenu des charges permanentes et d'exploitation induites par l'extension envisagée.

ANALYSE ET RENFORCEMENT STRUCTUREL D'UN BATIMENT EN VUE D'UNE EXTENSION EN HAUTEUR : Cas d'un ouvrage privé en cours d'exécution à Goma.

La figure suivante illustre le plan du rez-de-chaussée du bâtiment avec indication précise de l'emplacement des poteaux.

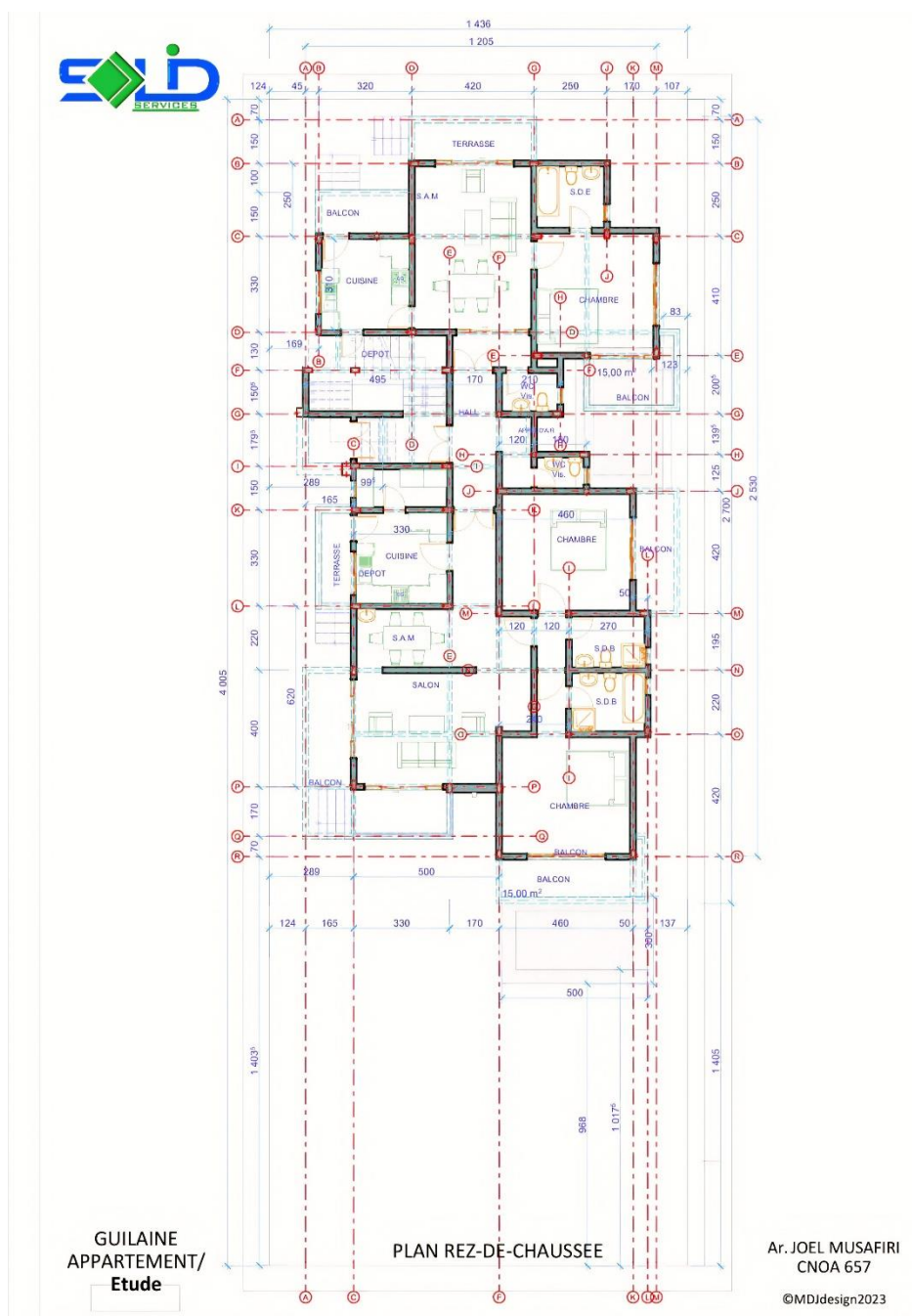


Figure 3-2 Figure Plan rez-de-chaussée avec indication de l'emplacement de poteau

3.3 PRESENTATION DU MODEL NUMERIQUE

3.3.1 Hypothèses de modélisation

La modélisation numérique de la structure étudiée a été réalisée à l'aide du logiciel Autodesk Robot Structural Analysis Professional, sur base des informations recueillies lors des investigations sur terrain et des plans disponibles. Étant donné les contraintes liées à l'accès limité à certaines données (plans d'exécution et matériels de prélèvement), les hypothèses de modélisation suivantes ont été retenues afin d'assurer une analyse réaliste et cohérente du comportement de l'ouvrage :

- Résistance caractéristique du béton
La résistance caractéristique du béton à 28 jours est prise égale à :
 $f_{c28}=25\text{MPa}$
- Caractéristiques mécaniques de l'acier
Les armatures sont supposées être en acier à haute adhérence (HA), avec une limite élastique égale à :
 $f_e=400\text{ MPa}$
- Hypothèse géométrique
Les dimensions des poteaux, poutres et dalles sont celles relevées sur site.
En l'absence de certains détails d'exécution, les sections sont supposées constantes sur toute la hauteur des éléments concernés.
- Conditions d'appui
Les fondations sont modélisées comme des encastremements parfaits, traduisant une transmission complète des efforts vers le sol. Cette hypothèse est retenue en raison de l'absence de données géotechniques détaillées et reste conservatrice pour l'analyse globale.
- Charges prises en compte
La modélisation prend en compte les charges permanentes (incluant le poids propre des éléments structuraux) et les charges d'exploitation (correspondant à l'usage du bâtiment d'habitation). Afin d'assurer une modélisation numérique réaliste et conforme aux conditions réelles d'exploitation du bâtiment, l'évaluation des charges permanentes a été

réalisée avec une attention particulière. Les charges permanentes prises en compte incluent le poids propre des éléments structuraux ainsi que les charges liées aux éléments non porteurs, notamment les murs de remplissage et les couches de recouvrement des dalles. Ces charges jouent un rôle déterminant dans la sollicitation des éléments porteurs et influencent directement les efforts internes obtenus lors des simulations numériques. [2].

Dans ce cadre, les Tableaux 3-1 et 3-2 présentent respectivement l'évaluation des charges permanentes dues aux murs et celles correspondant aux recouvrements de dalles.

Tableau 3-3 Evaluation de la charge permanente de murs [9]

Matériaux	Epaisseur (cm)	Densité (kN/m3)	Poids (kN/m²)
Blocs creux (15*20*40)	20	9	1.35
Enduit de ciment	5	18	0.9
<i>G_{murs}</i>			2.25

Tableau 3-4 Evaluation de la charge permanente pour les recouvrement de la dalle [9]

Matériaux	Epaisseur (cm)	Densité (kN/m3)	Poids (kN/m²)
Béton	15	25	3.75
Mortier de pose	2	21	0.42
Carrelage	1	22	0.22
<i>G_{dalle}</i>			4.39

Pour une maison à usage d'habitation, la charge d'exploitation est de 1,5KN/m².

- Hypothèse sur l'état de la structure existante
La structure est supposée ne pas présenter de dégradations majeures susceptibles d'influencer significativement sa capacité portante, conformément aux observations visuelles réalisées lors des visites de terrain.

3.3.2 Description du model 3D

Le modèle tridimensionnel de la structure a permis de représenter fidèlement la géométrie du bâtiment, la disposition des éléments porteurs ainsi que leurs liaisons. Les poteaux, poutres et dalles ont été modélisés à l'aide d'éléments finis adaptés, permettant une bonne représentation du comportement global de l'ouvrage sous charges.

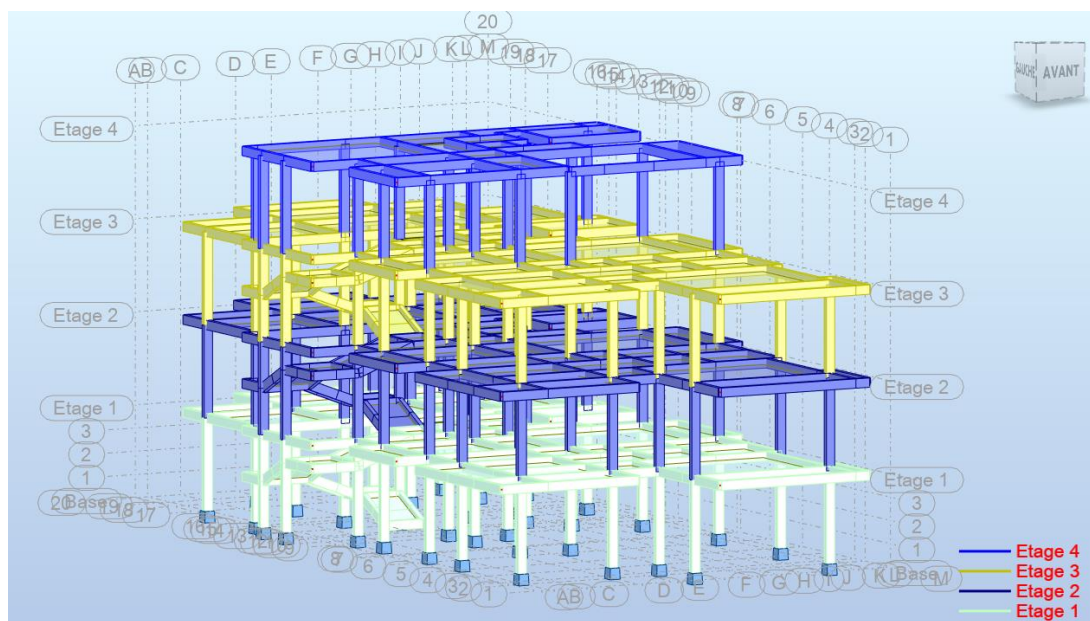


Figure 3-3 Modelisation en 3D de la Structure dans Robot

Ce modèle constitue la base de toutes les simulations effectuées et permet d'extraire les efforts internes nécessaires aux vérifications de résistance.

3.4 ANALYSE DES RESULTATS POUR LA STRUCTURE INITIALEMENT CONÇUE

3.4.1 Identification des éléments les plus sollicités

Les résultats de calcul ont permis d'identifier les poteaux les plus chargés de la structure, notamment celui situé aux niveaux inférieurs, qui reprend l'ensemble des charges verticales transmises par les étages supérieurs.

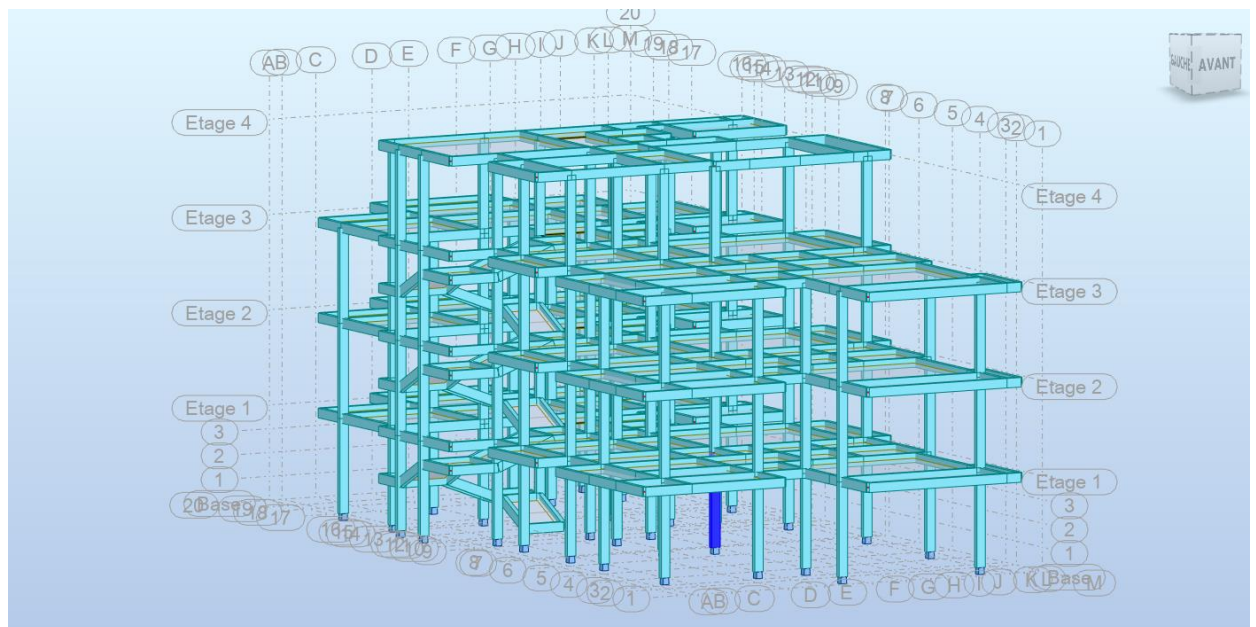


Figure 3-4 Emplacement du poteau 122 (le poteau le plus chargée)

3.4.2 Vérification de la capacité portante

Le poteau 122 est le poteau le plus chargé de l'ouvrage

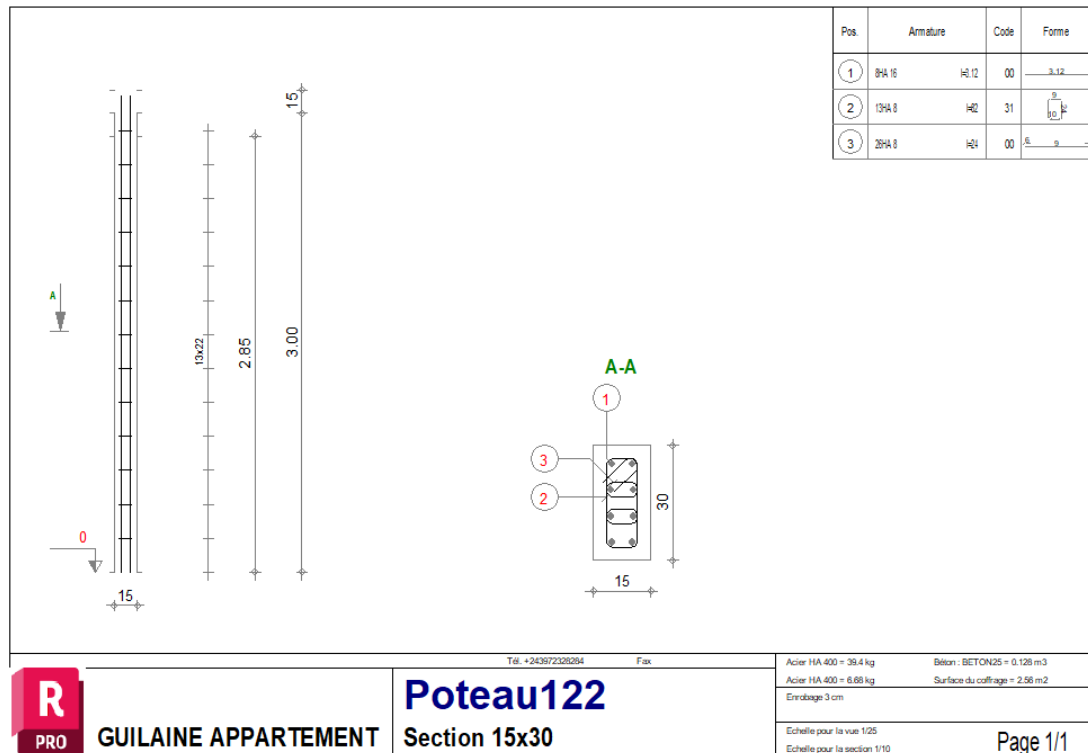


Figure 3-5 Plan d'exécution initiale des poteaux

L'analyse des résultats proposée par la feuilles de calcul montre que ce poteau a une capacité ultime de **N_{ulim} = 862.27 KN** (La charge maximale que peut supporter le poteau)

La charge pondérée a l'ELU qui est appliquée sur ce poteau est de **N_{r+3} = 615,82 KN** (La charge applique sur le poteau quand le bâtiment est à R+3), toujours selon le résultat proposé par notre feuille de calcul. Ainsi le Coefficients de Sécurité

$$Rd/Sd = 1,4 > 1$$

Ces résultats confirment que le poteau a été bien dimensionné initialement. Sans demande d'ajout de niveau supplémentaire, la sécurité et la stabilité de l'ouvrage sont bien garantis.

3.5 ANALYSE DES RESULTAT APRES AJOUT D'ETAGES SUPPLEMENTAIRES

- Une première simulation a été réalisée en considérant l'ajout d'un étage supplémentaire sur la structure sans modification des sections des éléments concernés.

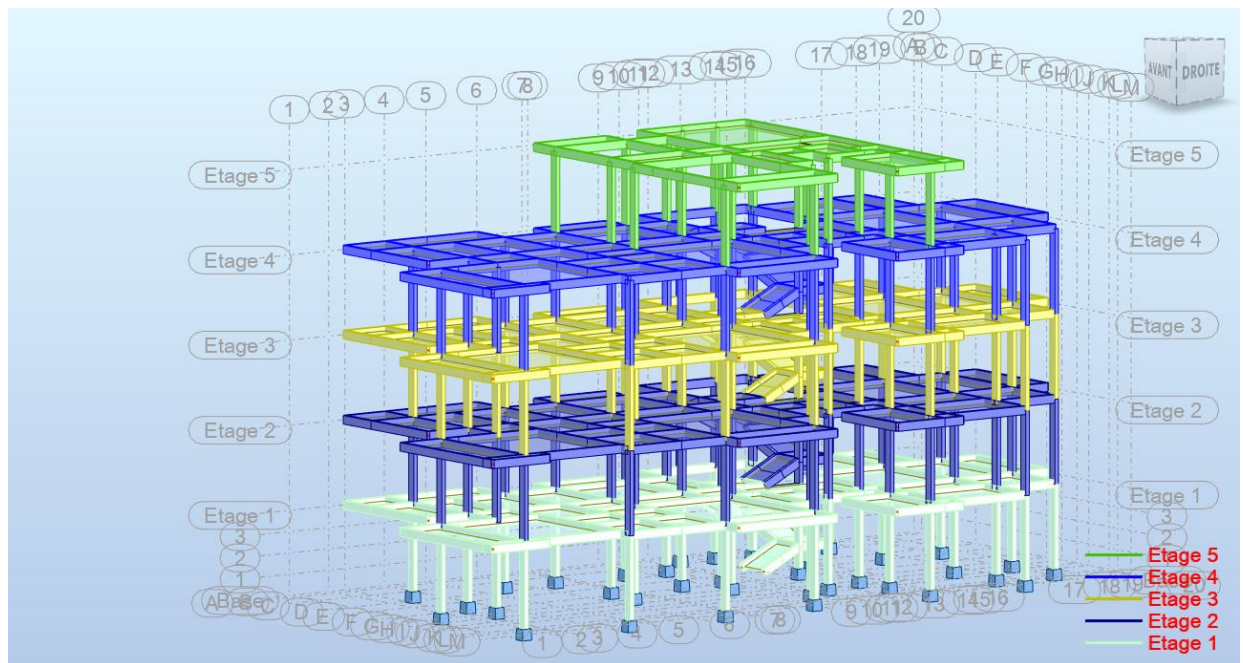


Figure 3-6 Modélisation 3D de la Structure après ajout du niveau supplémentaire

Les résultats obtenus ont montré une augmentation significative des efforts normaux dans les poteaux, mais celle-ci sont restée inférieure à la capacité ultime du poteau.

Nulim = 862.27 KN (La charge maximale que peut supporter le poteau)

Nr+4 = 797.08 KN (La charge appliquée sur le poteau quand le bâtiment est à R+4)

$$Rd/Sd = 1.08 > 1$$

- Une deuxième simulation a été réalisée en considérant l'ajout de deux étages supplémentaires sur la structure sans modification des sections des éléments porteurs.

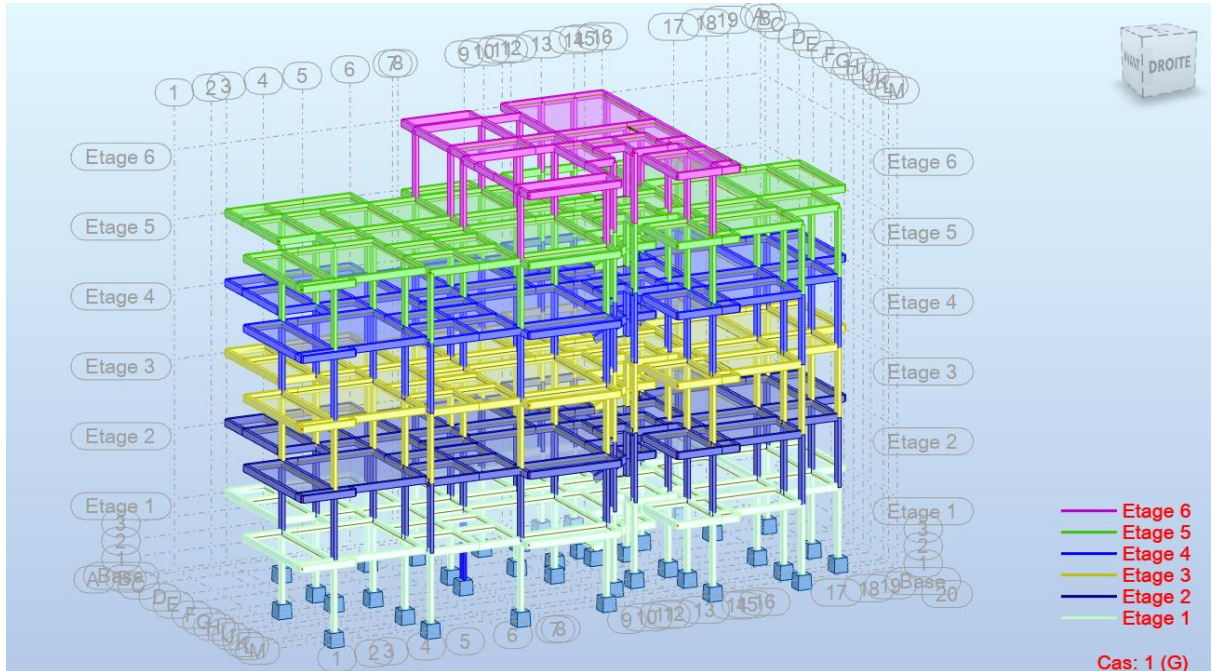


Figure 3-7 Modélisation 3D de la Structure après ajout de 2 niveaux supplémentaire.

Les résultats obtenus ont montré une augmentation encore plus significative des efforts normaux dans les poteaux, et cette fois-ci elles ont entraîné un dépassement des capacités ultime du poteau.

Nulim = 862.27 KN (La charge maximale que peut supporter le poteau)

Nr+5 = 969.84 KN (La charge applique sur le poteau quand le bâtiment est à R+5)

$$\mathbf{Rd/Sd = 0.89 < 1}$$

Cette situation a confirmé que l'extension en hauteur au dès là de R+4 ne peut être envisagée sans une intervention préalable de renforcement structurel.

3.6 PROPOSITION DU RENFORCEMENT PAR CHEMISAGE EN BETON ARME

3.6.1 Principe de renforcement retenu

Le renforcement par chemisage en béton armé a été retenu comme solution principale pour augmenter la capacité portante des poteaux les plus sollicités. Cette technique consiste à augmenter la section résistante des certains poteaux.

Les nouvelles dimensions et dispositions d'armatures ont été définies sur base des efforts recalculés après extension.

3.6.2 Résultat après renforcement

Les simulations effectuées après renforcement montrent une amélioration significative du comportement structurel du poteau renforcé. Les résultats indiquent que les sollicitations se situent désormais à l'intérieur du domaine de résistance des sections renforcées.

Cette amélioration traduit une augmentation notable de la capacité portante, de la rigidité et de la ductilité des éléments concernés, rendant techniquement faisable l'extension en hauteur envisagée.

Nultim = 1128,32KN (La charge maximale que peut supporter le poteau apres renforcement)

Nr+5 = 969.84 KN (La charge applique sur le poteau quand le bâtiment est à R+5)

$$\mathbf{Rd/Sd = 1,16}$$

3.7 PRESENTATION DES NOUVEAUX PLANS DE FERRAILLAGE

Sur base des résultats obtenus, de nouveaux plans de ferrailage ont été établis pour les poteaux renforcés. Ces plans précisent :

- Les nouvelles dimensions des sections après chemisage ;
- Le nombre et le diamètre des armatures longitudinales ajoutées ;
- La disposition des armatures transversales assurant le confinement du béton.

Ces documents constituent une base technique pour la mise en œuvre du renforcement sur le terrain.

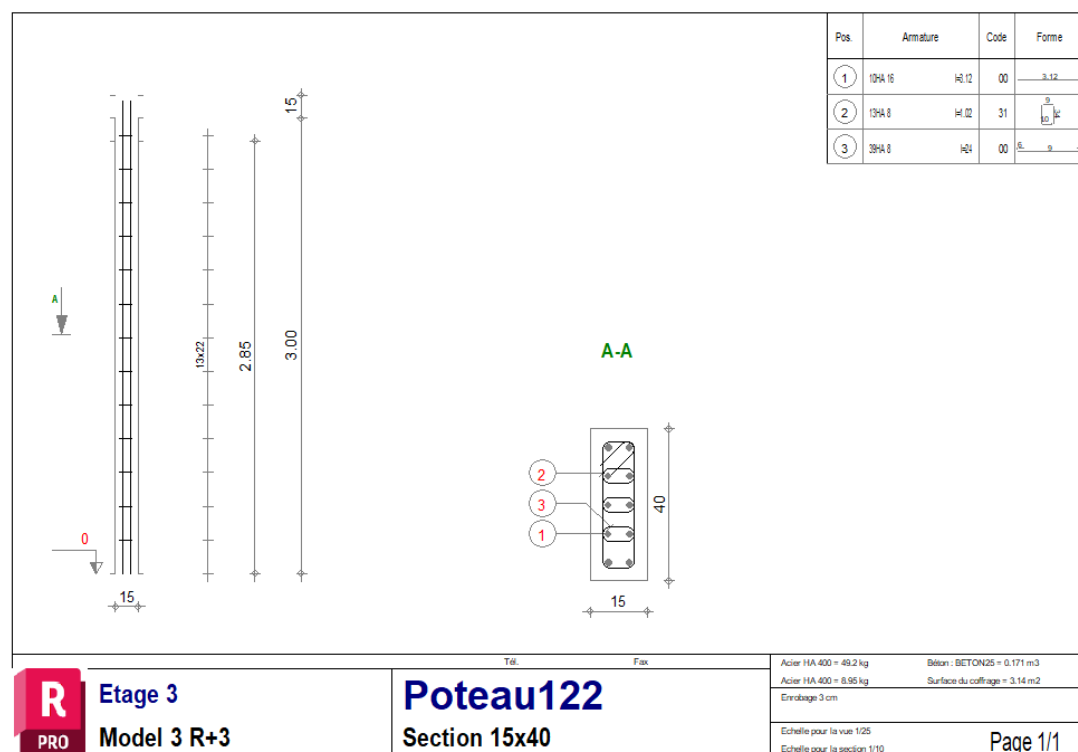


Figure 3-8 Plan de ferrailage du poteau les plus charge après renforcement.

3.8 JUSTIFICATION STRUCTURELLE DU RENFORCEMENT PAR CHEMISAGE EN BETON ARME PAR RAPPORT AU DIMENSIONNEMENT INITIAL

L'opération de renforcement par chemisage en béton armé ne constitue pas une rupture avec le dimensionnement initial de la structure, mais plutôt une continuité logique visant à adapter l'élément porteur aux nouvelles sollicitations induites par la surélévation. Il est donc essentiel d'expliquer clairement comment le poteau initialement dimensionné s'intègre au nouveau système renforcé.

Dans le cas étudié, le poteau a été initialement dimensionné pour un bâtiment R+3. Les calculs ont montré que sa capacité portante était suffisante pour cet état de charge, et même encore acceptable pour une extension à R+4. Cependant, l'ajout d'un deuxième niveau supplémentaire (R+5) entraîne un dépassement de la capacité ultime du poteau, ce qui rend nécessaire une augmentation de sa section résistante.

Le chemisage en béton armé consiste à augmenter la section du poteau existant. Concrètement, le poteau initial ne perd pas son rôle porteur : il continue à participer à la reprise des charges, mais il travaille désormais de manière solidaire avec le béton ajouté et les nouvelles armatures mises en place. L'ensemble (ancien béton + nouveau béton + armatures existantes + armatures ajoutées) forme une section composite unique, considérée comme monolithique après durcissement.

La Figure 3-9 (présentée au chapitre méthodologique) illustre le principe de cette liaison : les armatures ajoutées sont ancrées dans l'élément existant et confinées par des cadres transversaux, garantissant ainsi une transmission efficace des efforts entre les deux matériaux. Grâce à ce dispositif, les contraintes ne sont plus supportées uniquement par la section initiale, mais réparties sur une section élargie.

D'un point de vue calcul, le dimensionnement après renforcement ne considère plus la section initiale isolément, mais la nouvelle section totale issue du chemisage. L'augmentation de la surface de béton et du taux d'armatures entraîne :

- Une amélioration de la capacité portante axiale ;
- Une meilleure résistance au flambement ;
- Une augmentation de la ductilité et de la rigidité globale.

Ainsi, le renforcement par chemisage s'inscrit comme une adaptation rationnelle du dimensionnement initial aux nouvelles exigences structurelles. Il permet de conserver l'ossature existante tout en augmentant sa capacité mécanique, assurant ainsi la sécurité et la durabilité du bâtiment dans sa configuration étendue.

3.9 CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a permis de présenter et d'analyser les résultats issus de la modélisation et des calculs de vérification de la structure. L'analyse a mis en évidence l'insuffisance de la capacité portante du poteau le plus chargée face aux exigences d'une extension en hauteur au dès là de R+4.

Les simulations numériques ont confirmé la nécessité d'un renforcement structurel, et l'application du chemisage en béton armé s'est révélée efficace pour augmenter la capacité portante des poteaux les plus sollicités.

Ainsi, les résultats obtenus valident la pertinence de la solution de renforcement retenue et constituent une base solide pour la formulation des conclusions générales et des recommandations présentées dans la suite de ce travail.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail avait pour objectif principal d'analyser la capacité portante d'un bâtiment en béton armé en cours d'exécution à Goma, initialement conçu pour quatre niveaux (R+3), en vue d'une extension en hauteur, et de proposer, dans le cas échéant, des solutions de renforcement structurel adaptées. Cette étude s'inscrit dans un contexte urbain marqué par une pression foncière croissante et par une pratique récurrente de surélévation des bâtiments sans vérification technique préalable, exposant ainsi les ouvrages à des risques d'effondrement

Trois questions de recherche ont guidé notre travail. La première portait sur l'évaluation de l'état des éléments constitutifs de la structure sans nuire à son intégrité. Les investigations menées ont montré que les méthodes de diagnostic non destructives, notamment l'examen visuel, permettent d'obtenir des informations fiables sur l'état global de l'ouvrage bien que l'essai au scléromètre qui devrait nous rassurer de la qualité du béton en place tout en préservant la structure existante n'as pas été fait faute d'accès au matériel nécessaire.

La deuxième question concernait la détermination de la capacité portante de la structure existante. Les résultats issus de la modélisation numérique réalisée à l'aide du logiciel Autodesk Robot Structural Analysis ont permis d'évaluer avec précision le comportement de l'ouvrage sous charges. L'analyse a montré que la structure initialement conçue est suffisamment dimensionnée pour un usage R+3, et qu'une extension à R+4 reste techniquement envisageable sans intervention majeure. En revanche, l'ajout de deux niveaux supplémentaires (R+5) entraîne un dépassement de la capacité portante des poteaux les plus sollicités, rendant cette extension impossible sans renforcement préalable.

La troisième question portait sur les moyens d'améliorer la capacité portante de la structure existante. Les simulations réalisées après renforcement ont démontré que le chemisage en béton armé constitue une solution efficace et adaptée. Cette technique a permis d'augmenter

significativement la capacité portante, des poteaux critiques, rendant techniquement faisable l'extension en hauteur au-delà de R+4. Les nouveaux plans de ferrailage proposés constituent ainsi une contribution pratique et directement exploitable pour la mise en œuvre sur le terrain.

De manière générale, ce travail met en évidence l'importance d'une démarche méthodologique rigoureuse, combinant diagnostic, modélisation numérique et proposition de solutions techniques, pour garantir la sécurité et la durabilité des bâtiments faisant l'objet d'une extension en hauteur.

Malgré les résultats satisfaisants obtenus, ce travail présente certaines limites qu'il convient de souligner.

La principale contrainte rencontrée concerne l'indisponibilité de certains documents techniques, notamment les plans détaillés de ferrailage réellement exécutés et les données géotechniques du sol. En conséquence, certaines hypothèses ont dû être adoptées, notamment concernant les conditions d'appui des fondations et les caractéristiques mécaniques des matériaux, ce qui peut influencer la précision des résultats.

Par ailleurs, l'absence de l'essai au scléromètre n'a pas permis une validation expérimentale plus approfondie des caractéristiques mécaniques du béton.

Enfin, l'étude s'est focalisée essentiellement sur les poteaux les plus sollicités, sans approfondir l'analyse détaillée du comportement global de la structure face aux actions horizontales, notamment sismiques, pourtant importantes dans le contexte de la ville de Goma. Ces limites n'invalident toutefois pas les conclusions du travail, mais invitent à une interprétation prudente des résultats.

Les résultats obtenus ouvrent plusieurs perspectives de recherche et d'approfondissement.

En premier lieu, une étude intégrant des investigations géotechniques détaillées permettrait d'évaluer plus précisément l'interaction sol-structure et l'impact réel de l'extension en hauteur sur les fondations existantes.

Ensuite, il serait pertinent d'élargir l'analyse à un comportement dynamique et sismique de la structure renforcée, afin d'évaluer sa performance sous des sollicitations horizontales et de proposer, si nécessaire, des dispositifs complémentaires tels que des voiles de contreventement ou des renforcements mixtes.

Enfin, l'extension de cette méthodologie à un échantillon plus large de bâtiments existants à Goma contribuerait à l'élaboration de recommandations pratiques et de lignes directrices destinées aux ingénieurs, bureaux d'études et autorités locales, en vue d'encadrer et de sécuriser les projets d'extension en hauteur dans la ville.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] S. BENOUGHIDENE et R. MOUES, «Analyse sismique et renforcement d'un bâtiment existant en vue d'une extension,» l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, Guelma, 2022.
- [2] J.-P. MOUGIN, BAEL 91 modifié 99 et DTU associés, EYROLLES, 1999.
- [3] M. BOUKHEZAR, «REHABILITATION ET RENFORCEMENT DES POUTRES AU MOYEN DES MATERIAUX COMPOSITES,» Université Mentouri, Constantine, Constantine, 2009.
- [4] H. DAHMOUNE et H. OSMAN, «Techniques de réhabilitation et de renforcement des structures en béton armé,» Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2023.
- [5] G. HASSENE, «Technique de sélection des méthodes de renforcement des bâtiments en béton armé,» Université 8 Mai 1945, 2023.
- [6] M. Badra et H. Ilies, «Analyse d'une structure renforcée par matériaux composites,» Université Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent, 2022.
- [7] H. BELHANNACHI, «Réhabilitation et renforcement des poteaux en béton armé,» Université Mentouri, Constantine, 2009.
- [8] O. CHERKAoui, «Renforcement par chemisage en béton armé (cas pratique mode opératoire),» YouTube, 2022.
- [9] B. BARAKA, «Conception et dimensionnement d'un musée R+2 en BA dans la ville de Goma,» Université Libre des Pays de Grands Lacs, Goma, 2023.
- [10] JUnit.org. [En ligne]. Available: <http://www.junit.org>. [Accès le 2 Janvier 2019].
- [11] B. Mohammed, «Polycopie de cours : Projet structures en béton armé,» Université Hassiba Benbouali de Chlef, Chlef, 2020.

ANNEXES

A.1 PHOTO SUR TERRAIN



A.2 NOTES DE CALCUL

A.2.1 POUR R+3

1 Niveau:

- Nom :
- Niveau de l'étage : 0,00 (m)
- Tenue au feu : 0 h
- Fissuration : peu préjudiciable
- Milieu : non agressif

2 Poteau: Poteau122

Nombre d'éléments identiques: 1

2.1 Caractéristiques des matériaux:

- | | | |
|--------------------------|---------------------------|---|
| • Béton | : $f_{c28} = 25,00$ (MPa) | Poids volumique= 2501,36 (kg/m ³) |
| • Armature longitudinale | : type HA 400 | $f_e = 400,00$ (MPa) |
| • Armature transversale | : type HA 400 | $f_e = 400,00$ (MPa) |

2.2 Géométrie:

- | | | |
|-------|-----------------------|------------------|
| 2.2.1 | Rectangle | 15,0 x 30,0 (cm) |
| 2.2.2 | Epaisseur de la dalle | = 0,15 (m) |
| 2.2.3 | Sous dalle | = 3,00 (m) |
| 2.2.4 | Sous poutre | = 2,85 (m) |
| 2.2.5 | Enrobage | = 3,0 (cm) |

2.3 Hypothèses de calcul:

- | | |
|---------------------------------------|-------------------|
| • Calculs suivant | : BAEL 91 mod. 99 |
| • Dispositions sismiques | : non |
| • Poteau préfabriqué | : non |
| • Tenue au feu | : forfaitaire |
| • Prédimensionnement | : non |
| • Prise en compte de l'élancement | : oui |
| • Compression | : simple |
| • Cadres arrêtés | : sous plancher |
| • Plus de 50% des charges appliquées: | : après 90 jours |

2.4 Chargements:

Cas	Nature	Groupe	N (kN)
ELU	de calcul(Structurelle)	122	615,82
ELS	cal.ELS()	122	448,08

2.5 Résultats théoriques:

2.5.1 Analyse de l'Eclatement

	Lu (m)	K	λ			
Direction Y:				3,15	0,50	18,19
Direction Z:				3,15	0,50	36,37

2.5.2 Analyse détaillée

$\lambda = \max(\lambda_y; \lambda_z)$
 $\lambda = 36,37$
 $\lambda < 50$
 $\alpha = 0,85/(1+0,2*(\lambda/35)^2) = 0,70$
 $Br = 0,04 \text{ (m}^2\text{)}$
 $A = 16,08 \text{ (cm}^2\text{)}$
 $N_{lim} = \alpha[Br*fc28/(0,9*\gamma_b)+A*Fe/\gamma_s] = 862,27 \text{ (kN)}$

2.5.3 Ferrailage:

- Coefficients de sécurité
- global (Rd/Sd) = 1,40
- section d'acier réelle $A = 16,08 \text{ (cm}^2\text{)}$

2.6 Ferrailage:

Barres principales:

- 8 HA 400 16 $l = 3,12 \text{ (m)}$

Armature transversale:

- 13 Cad HA 400 8 $l = 0,82 \text{ (m)}$
 $e = 13*0,22 \text{ (m)}$
- 26 Ep HA 400 8 $l = 0,24 \text{ (m)}$
 $e = 13*0,22 \text{ (m)}$

3 Quantitatif:

- Volume de Béton = 0,13 (m3)
- Surface de Coffrage = 2,57 (m2)
- Acier HA 400
 - Poids total = 46,09 (kG)
 - Densité = 359,37 (kG/m3)
 - Diamètre moyen = 12,8 (mm)
 - Liste par diamètres:

Diamètre	Longueur (m)	Poids (kG)
8	16,92	6,68
16	24,96	39,41

A.2.2 POUR R+4

1 Niveau:

- Nom :
- Niveau de l'étage : 0,00 (m)
- Tenue au feu : 0 h
- Fissuration : peu préjudiciable
- Milieu : non agressif

2 Poteau: Poteau122

Nombre d'éléments identiques: 1

2.1 Caractéristiques des matériaux:

- Béton : $f_{c28} = 25,00$ (MPa) Poids volumique= 2501,36 (kg/m³)
- Armature longitudinale : type HA 400 $f_e = 400,00$ (MPa)
- Armature transversale : type HA 400 $f_e = 400,00$ (MPa)

2.2 Géométrie:

- 2.2.1 Rectangle 15,0 x 30,0 (cm)
- 2.2.2 Epaisseur de la dalle = 0,15 (m)
- 2.2.3 Sous dalle = 3,00 (m)
- 2.2.4 Sous poutre = 2,85 (m)
- 2.2.5 Enrobage = 3,0 (cm)

2.3 Hypothèses de calcul:

- Calculs suivant : BAEL 91 mod. 99
- Dispositions sismiques : non
- Poteau préfabriqué : non
- Tenue au feu : forfaitaire
- Prédimensionnement : non
- Prise en compte de l'éclatement : oui
- Compression : simple
- Cadres arrêtés : sous plancher
- Plus de 50% des charges appliquées: : après 90 jours

2.4 Chargements:

Cas	Nature	Groupe	N (kN)
ELU	de calcul(Structurelle)	122	797,08
ELS	cal.ELS()	122	579,95

2.5 Résultats théoriques:

2.5.1 Analyse de l'Elancement

	Lu (m)	K	λ	
Direction Y:				3,15 0,50 18,19
Direction Z:				3,15 0,50 36,37

2.5.2 Analyse détaillée

$\lambda = \max(\lambda_y; \lambda_z)$
 $\lambda = 36,37$
 $\lambda < 50$
 $\alpha = 0,85/(1+0,2*(\lambda/35)^2) = 0,70$
 $Br = 0,04 \text{ (m}^2\text{)}$
 $A = 16,08 \text{ (cm}^2\text{)}$
 $N_{ulim} = \alpha[Br*fc28/(0,9*\gamma_b) + A*Fe/\gamma_s] = 862,27 \text{ (kN)}$

2.5.3 Ferrailage:

- Coefficients de sécurité
- global (Rd/Sd) = 1,08
- section d'acier réelle A = 16,08 (cm²)

2.6 Ferrailage:

Barres principales:

- 8 HA 400 16 l = 3,12 (m)

Armature transversale:

- 13 Cad HA 400 8 l = 0,82 (m)
e = 13*0,22 (m)
- 26 Ep HA 400 8 l = 0,24 (m)
e = 13*0,22 (m)

3 Quantitatif:

- Volume de Béton = 0,13 (m³)
- Surface de Coffrage = 2,57 (m²)
- Acier HA 400
 - Poids total = 46,09 (kG)
 - Densité = 359,37 (kG/m³)
 - Diamètre moyen = 12,8 (mm)
 - Liste par diamètres:

Diamètre	Longueur (m)	Poids (kG)
8	16,92	6,68
16	24,96	39,41

A.2.3 POUR R+5 AVANT RENFORCEMENT

1 Niveau:

- Nom :
- Niveau de l'étage : 0,00 (m)
- Tenue au feu : 0 h
- Fissuration : peu préjudiciable
- Milieu : non agressif

2 Poteau: Poteau122

Nombre d'éléments identiques: 1

2.1 Caractéristiques des matériaux:

- Béton : $f_{c28} = 25,00$ (MPa) Poids volumique= 2501,36 (kg/m³)
- Armature longitudinale : type HA 400 $f_e = 400,00$ (MPa)
- Armature transversale : type HA 400 $f_e = 400,00$ (MPa)

2.2 Géométrie:

- 2.2.1 Rectangle 15,0 x 30,0 (cm)
- 2.2.2 Epaisseur de la dalle = 0,15 (m)
- 2.2.3 Sous dalle = 3,00 (m)
- 2.2.4 Sous poutre = 2,85 (m)
- 2.2.5 Enrobage = 3,0 (cm)

2.3 Hypothèses de calcul:

- Calculs suivant : BAEL 91 mod. 99
- Dispositions sismiques : non
- Poteau préfabriqué : non
- Tenue au feu : forfaitaire
- Prédimensionnement : non
- Prise en compte de l'élanement : oui
- Compression : simple
- Cadres arrêtés : sous plancher
- Plus de 50% des charges appliquées: : après 90 jours

ANALYSE ET RENFORCEMENT STRUCTUREL D'UN BATIMENT EN VUE D'UNE EXTENSION EN HAUTEUR : Cas d'un ouvrage privé en cours d'exécution à Goma.

2.4 Chargements:

Cas	Nature	Groupe	N (kN)
ELU	de calcul(Structurelle)	122	969,84
ELS	cal.ELS()	122	705,64

2.5 Résultats théoriques:

La capacité ultime du poteau n'est pas satisfaisante.

2.5.1 Analyse de l'Elancement

	Lu (m)	K	λ		
Direction Y:	3,15	0,50	18,19		
Direction Z:	3,15	0,50	36,37		

2.5.2 Analyse détaillée

$\lambda = \max(\lambda_y; \lambda_z)$
 $\lambda = 36,37$
 $\lambda < 50$
 $\alpha = 0,85 / (1 + 0,2 * (\lambda / 35)^2) = 0,70$
 $Br = 0,04 \text{ (m}^2\text{)}$
 $A = 16,08 \text{ (cm}^2\text{)}$
 $N_{ulim} = \alpha [Br * f_{c28} / (0,9 * \gamma_b) + A * f_{e / \gamma_s}] = 862,27 \text{ (kN)}$

2.5.3 Ferrailage:

- Coefficients de sécurité
- global (Rd/Sd) = 0,89
- section d'acier réelle $A = 16,08 \text{ (cm}^2\text{)}$

2.6 Ferrailage:

Barres principales:

- 8 HA 400 16 $l = 3,12 \text{ (m)}$

Armature transversale:

- 13 Cad HA 400 8 $l = 0,82 \text{ (m)}$
 $e = 13 * 0,22 \text{ (m)}$
- 26 Ep HA 400 8 $l = 0,24 \text{ (m)}$
 $e = 13 * 0,22 \text{ (m)}$

3 Quantitatif:

- Volume de Béton = 0,13 (m3)
- Surface de Coffrage = 2,57 (m2)
- Acier HA 400
 - Poids total = 46,09 (kG)
 - Densité = 359,37 (kG/m3)
 - Diamètre moyen = 12,8 (mm)
 - Liste par diamètres:

Diamètre	Longueur (m)	Poids (kG)
8	16,92	6,68
16	24,96	39,41

A.2.4 POUR R+5 APRES RENFORCEMENT

1 Niveau:

- Nom :
- Niveau de l'étage : 0,00 (m)
- Tenue au feu : 0 h
- Fissuration : peu préjudiciable
- Milieu : non agressif

2 Poteau: Poteau122

Nombre d'éléments identiques: 1

2.1 Caractéristiques des matériaux:

- Béton : $f_{c28} = 25,00$ (MPa) Poids volumique = 2501,36 (kg/m³)
- Armature longitudinale : type HA 400 $f_e = 400,00$ (MPa)
- Armature transversale : type HA 400 $f_e = 400,00$ (MPa)

2.2 Géométrie:

- 2.2.1 Rectangle 15,0 x 40,0 (cm)
- 2.2.2 Epaisseur de la dalle = 0,15 (m)
- 2.2.3 Sous dalle = 3,00 (m)
- 2.2.4 Sous poutre = 2,85 (m)
- 2.2.5 Enrobage = 3,0 (cm)

2.3 Hypothèses de calcul:

- Calculs suivant : BAEL 91 mod. 99
- Dispositions sismiques : non
- Poteau préfabriqué : non
- Tenue au feu : forfaitaire
- Prédimensionnement : non
- Prise en compte de l'éclatement : oui
- Compression : simple
- Cadres arrêtés : sous plancher
- Plus de 50% des charges appliquées : après 90 jours

2.4 Chargements:

Cas	Nature	Groupe	N (kN)
ELU	de calcul(Structurelle)	122	969,84
ELS	cal.ELS()	122	705,64

2.5 Résultats théoriques:

2.5.1 Analyse de l'Elancement

	Lu (m)	K	λ
Direction Y:			3,15 0,50 13,64
Direction Z:			3,15 0,50 36,37

2.5.2 Analyse détaillée

$\lambda = \max(\lambda_y ; \lambda_z)$
 $\lambda = 36,37$
 $\lambda < 50$
 $\alpha = 0,85 / (1 + 0,2 * (\lambda / 35)^2) = 0,70$
 $Br = 0,05 \text{ (m}^2\text{)}$
 $A = 20,11 \text{ (cm}^2\text{)}$
 $N_{lim} = \alpha [Br * f_{cd} / (0,9 * \gamma_b) + A * f_{ed} / \gamma_s] = 1128,32 \text{ (kN)}$

2.5.3 Ferrailage:

- Coefficients de sécurité
- global (Rd/Sd) = 1,16
- section d'acier réelle A = 20,11 (cm²)

2.6 Ferrailage:

Barres principales:

- 10 HA 400 16 l = 3,12 (m)

Armature transversale:

- 13 Cad HA 400 8 l = 1,02 (m)
e = 13 * 0,22 (m)
- 39 Ep HA 400 8 l = 0,24 (m)
e = 13 * 0,22 (m)

3 Quantitatif:

- Volume de Béton = 0,17 (m³)
- Surface de Coffrage = 3,14 (m²)
- Acier HA 400
 - Poids total = 58,22 (kG)
 - Densité = 340,45 (kG/m³)
 - Diamètre moyen = 12,6 (mm)
 - Liste par diamètres:

Diamètre	Longueur (m)	Poids (kG)
8	22,69	8,96
16	31,20	49,26