

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Préambule

La croissance urbaine rapide observée dans plusieurs villes africaines, notamment en République Démocratique du Congo, s'accompagne d'un besoin accru en infrastructures durables et sûres. Dans ce contexte, la construction de bâtiments à étages représente une réponse concrète aux exigences d'optimisation de l'espace foncier en milieu urbain dense. Toutefois, la réussite de tels ouvrages repose sur des bases techniques solides, dont le dimensionnement rigoureux des fondations constitue un élément déterminant. Avant toute entreprise constructive, une réflexion approfondie s'impose quant aux caractéristiques du sol, aux charges structurelles, ainsi qu'aux contraintes géotechniques, environnementales et urbanistiques du site.

2. But du travail

Ce travail a pour but principal de proposer une démarche technique rigoureuse pour le dimensionnement d'une fondation adaptée à un bâtiment de type R+5 à usage d'habitation et commercial, implanté dans un environnement urbain contraint comme le quartier ALLI-LAC. Il vise à démontrer que la stabilité d'un tel édifice repose avant tout sur une compréhension fine des caractéristiques du sol, une évaluation précise des charges à transférer et un choix judicieux du type de fondation.

Ce but implique de mettre en évidence l'importance de la géotechnique dans le processus de conception, de faire ressortir les interactions entre le sol et la structure, et de souligner la nécessité d'intégrer les contraintes techniques, économiques et urbanistiques dans le choix des solutions structurelles.

3. Les objectifs

Ce travail de recherche poursuit plusieurs objectifs spécifiques, en lien direct avec les problématiques techniques et contextuelles du projet étudié. Il s'agit notamment de :

- ✓ Identifier et analyser les différentes charges agissant sur un bâtiment R+5, qu'elles soient permanentes, variables, ou accidentelles (vent, séisme) ;
- ✓ Étudier les caractéristiques géotechniques du site d'implantation afin de déterminer les propriétés mécaniques du sol et sa capacité portante ;

✓ Choisir un type de fondation adapté à la configuration du terrain et à la nature des charges à transférer ;

✓ Élaborer une modélisation fiable de la fondation en s'appuyant sur des méthodes de calcul reconnues et conformes aux normes en vigueur ;

✓ Fournir des recommandations techniques pour l'exécution des travaux, en tenant compte des contraintes urbaines, environnementales et économiques propres au quartier ALLI-LAC.

Ces objectifs permettront de guider la démarche méthodologique adoptée dans le cadre de ce travail et de garantir la pertinence des solutions proposées.

4. Problématique

Selon Jean-Pierre Dupuy, la problématique est « *l'ensemble des questionnements qui orientent une réflexion scientifique et permettent de structurer une analyse critique autour d'un sujet donné* ». ¹ Elle constitue ainsi le fil conducteur d'une recherche rigoureuse et fondée. Dans le contexte de l'urbanisation rapide des villes congolaises, le développement vertical des constructions, notamment à travers les bâtiments à plusieurs étages, devient une solution incontournable face à la pression foncière. Le quartier ALLI-LAC, à Lubumbashi, n'échappe pas à cette dynamique. Toutefois, la conception et la réalisation d'un bâtiment de type R+5 exigent une attention particulière à la stabilité de l'édifice, dont la fondation constitue l'élément porteur fondamental.

Or, le dimensionnement d'une fondation dépend de plusieurs paramètres géotechniques, structurels et environnementaux. Il ne s'agit pas simplement de concevoir une base supportant la masse du bâtiment, mais d'assurer sa durabilité, sa résistance aux charges statiques et dynamiques, ainsi que sa sécurité face aux mouvements du sol, aux infiltrations, et à d'éventuelles contraintes sismiques. Dans le cas du quartier ALLI-LAC, plusieurs bâtiments ont souffert de tassements différentiels, de fissures structurelles ou d'effondrements partiels, en raison d'un dimensionnement inadapté ou d'études géotechniques insuffisantes.

Face à ces préoccupations, notre étude soulève une problématique centrale : comment garantir un dimensionnement adéquat des fondations pour un bâtiment R+5, à usage mixte,

¹ DUPUY, Jean-Pierre, L'énigme de la raison : une approche philosophique et scientifique, 1^{re} éd., Seuil : Paris, 2016, p. 78.

dans une zone à forte densité urbaine comme ALLI-LAC, en prenant en compte les caractéristiques mécaniques du sol, les charges de l'ouvrage, ainsi que les normes de sécurité en vigueur ?

De cette problématique principale découlent les interrogations suivantes :

0. Quelles sont les caractéristiques géotechniques du sol au quartier ALLI-LAC, et en quoi influencent-elles le choix du type de fondation à adopter ?

1. Comment déterminer les charges admissibles sur les fondations d'un bâtiment R+5 à usage mixte, en conformité avec les normes en vigueur ?

2. Quel modèle de fondation (semelles isolées, radier, pieux...) est le mieux adapté au contexte du site, tant sur le plan technique qu'économique ?

5. Hypothèses

L'hypothèse, en tant que réponse provisoire aux interrogations scientifiques, permet d'orienter l'analyse vers une validation empirique et technique.² Ainsi, nous formulons les hypothèses suivantes :

Premièrement, nous supposons que l'étude préalable des propriétés mécaniques du sol (portance, compacité, humidité, profondeur de la nappe phréatique) dans le quartier ALLI-LAC permettra d'identifier les contraintes spécifiques du terrain, et ainsi de guider le choix d'un type de fondation optimal, adapté à la nature du sol.

Deuxièmement, nous pensons que l'évaluation rigoureuse des charges (charges permanentes et variables), ainsi que la prise en compte des coefficients de sécurité, permettra d'établir des dimensions fiables pour les fondations, capables de garantir la stabilité du bâtiment sur le long terme.

Troisièmement, nous posons comme hypothèse que le recours à une solution de fondation profonde ou semi-profonde, comme les semelles combinées ou le radier général, s'avérera plus efficace dans ce contexte urbain dense, où l'occupation du sol, les contraintes de voisinage et les risques de tassement nécessitent des fondations renforcées.

Ces hypothèses guideront notre démarche méthodologique, en nous permettant de vérifier, à travers des calculs de dimensionnement et des analyses géotechniques, la pertinence

² P. RONGERE, Méthodes des sciences, Paris, Dalloz, 1979, p.20.

des choix structurels à faire pour garantir un édifice à la fois durable, sécuritaire et économiquement viable dans le quartier ALLI-LAC.

6. État de la question

Dans cette section, nous avons passé en revue plusieurs travaux portant sur la problématique du dimensionnement des fondations dans les bâtiments à plusieurs niveaux, en contexte urbain. Ces études, menées dans divers milieux similaires à celui de Lubumbashi, nous ont permis de mieux comprendre les enjeux techniques, les approches méthodologiques et les erreurs récurrentes observées dans le dimensionnement des fondations d'ouvrages à usage mixte.

Benoît KASONGO, dans son mémoire intitulé « *Étude géotechnique pour le dimensionnement des fondations d'un immeuble R+4 à usage mixte à Kinshasa* », ³ propose une méthodologie basée sur des essais de sol, le calcul des contraintes admissibles et la justification des choix entre fondations superficielles et profondes. Son approche repose sur une modélisation rigoureuse des charges et une prise en compte des caractéristiques mécaniques du sol. Toutefois, son travail ne tient pas compte des spécificités liées à l'usage mixte du bâtiment, en particulier les variations de charge entre les zones commerciales et résidentielles, que nous nous proposons d'intégrer dans notre propre analyse.

Marie-Louise TSHIAMBBA, dans son étude « *Pathologies des bâtiments en Afrique centrale : cas des fondations sous-dimensionnées* », ⁴ met en évidence les défaillances récurrentes dans les projets immobiliers causées par l'absence d'étude géotechnique ou par une mauvaise interprétation des données du sol. Elle évoque des cas concrets de tassements différentiels, de fissures structurelles et de sinistres qui affectent la durabilité des bâtiments. Contrairement à son approche essentiellement postérieure à la construction, notre travail se veut préventif, en dimensionnant correctement les fondations en amont de l'édification de l'ouvrage.

David MULUMBA, dans son ouvrage « *Fondations et structures porteuses dans le bâtiment : conception, dimensionnement et adaptation aux sols africains* », ⁵ propose une classification des types de fondations et présente les critères techniques de choix en fonction

³ KASONGO, Benoît. *Étude géotechnique pour le dimensionnement des fondations d'un immeuble R+4 à usage mixte à Kinshasa*. Mémoire de fin d'études, Institut Supérieur des Techniques Appliquées, Kinshasa, 2019, p. 35.

⁴ TSHIAMBBA, Marie-Louise. *Pathologies des bâtiments en Afrique centrale : cas des fondations sous-dimensionnées*. Lubumbashi : Éditions Polytech, 2021, p. 44.

⁵ MULUMBA, David. *Fondations et structures porteuses dans le bâtiment : conception, dimensionnement et adaptation aux sols africains*. 2^e éd., Kinshasa : Presses Universitaires du Congo, 2020, p. 61.

des propriétés du sol, de la hauteur du bâtiment et de l'environnement immédiat. Il insiste notamment sur le rôle du radier et des pieux dans les sols peu portants. Néanmoins, son analyse reste d'ordre général et ne se rapporte pas à des cas précis. C'est là que notre étude se différencie, en s'appuyant sur des données du terrain du quartier ALLI-LAC à Lubumbashi.

Jean-Marc TSHIBANDA, dans son étude « *Risques géotechniques et sécurité des bâtiments en RDC : état des lieux et perspectives* », ⁶ attire l'attention sur l'absence d'une culture technique en matière d'analyse du sol dans la plupart des projets urbains en RDC. Il plaide pour la vulgarisation des études géotechniques et l'usage systématique des logiciels de calcul. Si sa réflexion a une portée normative et institutionnelle, notre travail, quant à lui, adopte une approche technique opérationnelle et contextualisée, appliquée à un cas réel dans un quartier urbain en pleine densification.

En somme, ces études confirment toutes la nécessité d'un bon dimensionnement des fondations pour assurer la stabilité des structures. Cependant, notre travail se distingue par son ancrage local dans le quartier ALLI-LAC de la ville de Lubumbashi, par la spécificité de son objet (un bâtiment R+5 à usage résidentiel et commercial), et par sa finalité pratique. Il vient ainsi enrichir la littérature technique existante avec une étude de cas contextualisée, susceptible de servir de référence pour des projets similaires dans d'autres zones urbaines congolaises.

7. Délimitation du travail

Le dimensionnement d'une fondation pour un bâtiment R+5 constitue un sujet à la fois technique et multidimensionnel, relevant du domaine de la géotechnique, du calcul de structures et de l'ingénierie du bâtiment. Pour assurer la clarté et la pertinence de notre démarche scientifique, il est indispensable d'en circonscrire les limites sur les plans temporel, spatial et matériel.

✓ Délimitation temporelle

Notre étude s'inscrit dans une période allant de 2020 à 2025, correspondant aux années récentes où les techniques modernes de reconnaissance de sol, de modélisation des structures et de dimensionnement des fondations se sont vulgarisées dans les pratiques de l'ingénierie civile en RDC. Ce cadre temporel permet de tenir compte des normes et des outils

⁶ TSHIBANDA, Jean-Marc. *Risques géotechniques et sécurité des bâtiments en RDC : état des lieux et perspectives*. Goma : Centre Africain d'Études Techniques, 2022, p. 27.

de calcul actuellement en usage, tout en se basant sur les connaissances actualisées en géomécanique et en béton armé.

✓ Délimitation spatiale

L'analyse est spécifiquement centrée sur un site géographique bien défini : le quartier ALLI-LAC, situé dans la ville de Lubumbashi, province du Haut-Katanga, en République Démocratique du Congo. Ce choix est justifié par les caractéristiques géotechniques particulières de cette zone, où les sols présentent une variabilité importante (présence de latérite, nappe phréatique proche, altérites profondes), nécessitant une approche localisée du dimensionnement. L'étude ne tient donc pas compte des conditions géologiques d'autres régions.

✓ Délimitation matérielle

Le présent travail se limite à l'étude technique du dimensionnement des fondations du bâtiment projeté, en intégrant les données du sol, les charges structurales et les normes de calcul en vigueur. L'étude porte spécifiquement sur le choix du type de fondation adapté (semelles, radier ou fondations profondes), le calcul des dimensions, la vérification des contraintes admissibles du sol, ainsi que l'analyse des tassements. Elle n'aborde pas les aspects architecturaux détaillés de l'ouvrage, les éléments de superstructure (poteaux, poutres, planchers), les installations électriques ou sanitaires, ni les considérations économiques, juridiques ou urbanistiques liées à l'obtention du permis de construire. Les simulations s'arrêtent au comportement des fondations en phase de service, sans inclure des études sismiques poussées ni la modélisation d'événements extrêmes rares.

8. Subdivision du travail

Hormis l'introduction et la conclusion, notre travail est subdivisé en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre est consacré aux généralités relatives au dimensionnement des fondations de bâtiment et à la présentation du site d'étude.
- Le deuxième chapitre traite du prédimensionnement des éléments structureux.
- Le troisième chapitre est dédié au dimensionnement proprement dit des éléments porteurs.

Figure II.2

Vue en plan type des étages – Répartition des unités d'habitation et des circulations verticales.

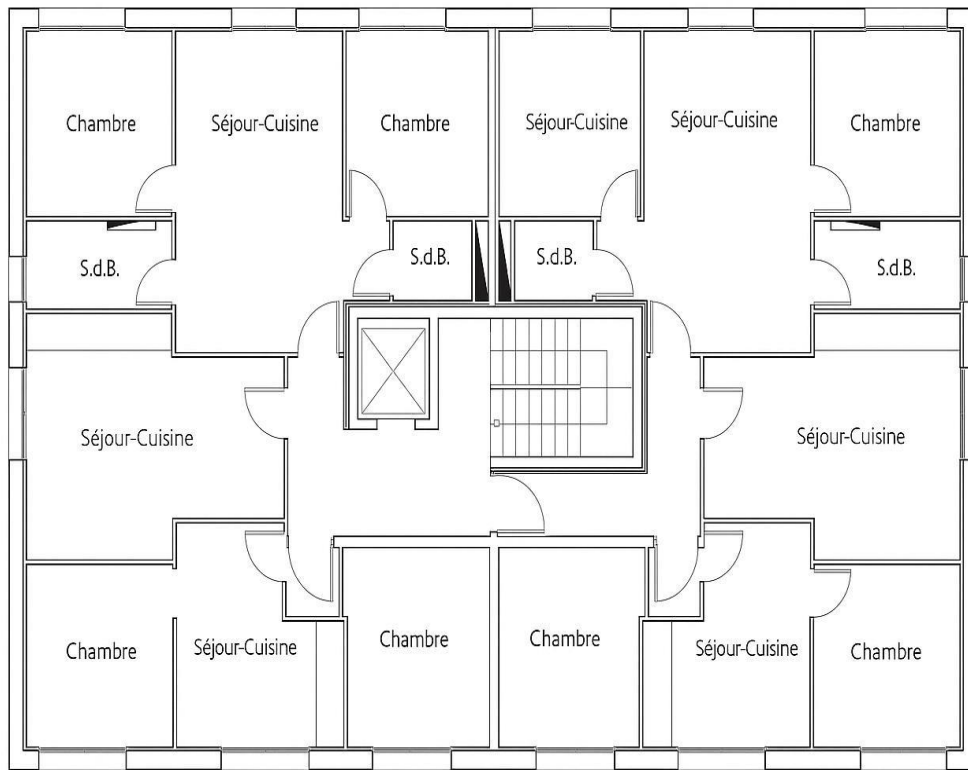


Figure II.2 : Vue en plan type des étages – Répartition des unités d'habitation et des circulations verticales.

Figure II.3

Vue en plan type du toit-terrasse – Disposition du local technique et accès via l'escalier.

Toit-terrasse

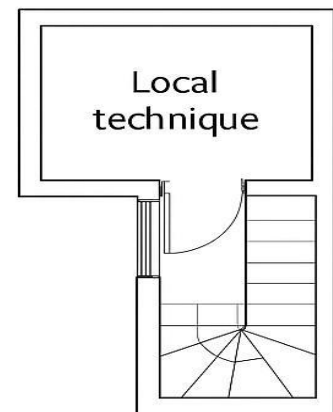


Figure II.3 : Vue en plan type du toit-terrasse

Figure II.4

Vue 3D extérieure du bâtiment R+5 – Illustration de la volumétrie générale et du contraste entre usage commercial (rez-de-chaussée) et résidentiel (étages).



Figure II.4 : Vue 3D extérieure du bâtiment R+5

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LE DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS ET LE SITE D'ÉTUDE

Dans ce chapitre, il sera question de présenter les notions fondamentales relatives au dimensionnement des fondations, dans le but de mieux cerner les enjeux techniques associés à la stabilité d'un bâtiment R+5. La première section sera consacrée aux aspects conceptuels, notamment à la typologie des fondations, aux principes qui régissent leur dimensionnement, ainsi qu'aux contraintes techniques spécifiques engendrées par les charges structurales d'un immeuble à plusieurs niveaux. La seconde section portera sur la présentation du site d'implantation choisi, en l'occurrence le quartier ALLI-LAC, situé dans la ville de Lubumbashi. Il s'agira d'examiner les particularités géographiques, géotechniques et environnementales de la zone afin d'évaluer leur influence sur le choix du type de fondation à adopter pour ce projet mixte à usage d'habitation et commercial.

1.1. Notions générales sur les fondations de bâtiment

1.1.1. Types de fondations : superficielles, profondes, spéciales

Le choix du type de fondation constitue l'une des décisions les plus critiques dans le processus de conception et de réalisation d'un ouvrage de génie civil. En effet, la fondation représente l'interface entre la structure du bâtiment et le sol naturel. Elle a pour rôle fondamental de transférer les charges issues de l'édifice (poids propre, charges d'exploitation, actions sismiques, effets du vent, etc.) vers les couches de sol capables de les supporter sans provoquer des déformations nuisibles, des tassements différentiels, ou encore des instabilités structurales.⁷ Pour cela, une classification technique des fondations est généralement admise dans la pratique de l'ingénierie géotechnique. Elle distingue trois grandes familles : les fondations superficielles, les fondations profondes, et les fondations dites spéciales.

a) Les fondations superficielles

Les fondations superficielles sont les plus simples, les plus économiques et les plus fréquemment utilisées, surtout lorsque le sol porteur est situé à une faible profondeur, généralement inférieure ou égale à trois mètres. Dans ce cas, la capacité portante du sol est suffisante dès les premières couches, et la nature du sol (argile compacte, sable dense, latérite

⁷ MOLLARD, J., & LAMY, A. Géotechnique pour les fondations. 2^e éd., Paris : Eyrolles, 2015, p. 45.

homogène) permet un ancrage direct de la structure sans recours à des techniques de forage profond.⁸ On distingue plusieurs formes de fondations superficielles :

- Les semelles isolées sont utilisées pour supporter individuellement les poteaux d'un bâtiment. Elles sont dimensionnées pour répartir la charge ponctuelle sur une surface suffisante du sol. Elles peuvent être carrées, rectangulaires ou circulaires selon les sollicitations.
- Les semelles filantes, quant à elles, sont réalisées sous les murs porteurs. Elles permettent une répartition linéaire des charges sur le sol. Elles sont couramment employées dans les constructions classiques à plusieurs niveaux.
- Le radier général, aussi appelé fondation par dalle pleine, est une large plaque en béton armé qui s'étend sous toute la surface de la construction. Il est approprié lorsque les charges sont importantes ou que la portance du sol est modérée mais uniforme. Cette solution permet également de limiter les tassements différentiels.⁹

Les fondations superficielles sont donc privilégiées lorsque le terrain est homogène, sec, stable, et que les charges à supporter ne sont pas excessives. Cependant, leur efficacité est fortement réduite en présence d'un sol meuble, gorgé d'eau ou sujet à des affaissements.

b) Les fondations profondes

Lorsque les couches superficielles du sol sont peu résistantes, instables ou hétérogènes, il devient nécessaire d'aller chercher la bonne couche porteuse en profondeur. C'est dans ce cas qu'interviennent les fondations profondes. Elles permettent de transférer les charges de la structure vers des strates plus compactes ou rocheuses situées bien plus bas. Ce type de fondation est également indispensable dans les constructions de grande hauteur (R+5 ou plus), ou sur des terrains sujets aux tassements importants.¹⁰ Parmi les formes les plus utilisées, on retrouve :

- Les pieux, qui sont des éléments verticaux cylindriques ou prismatiques (en béton armé, bois, acier ou béton précontraint), forés ou battus dans le sol. Ils fonctionnent selon deux principes : le frottement latéral (dans le cas des pieux

⁸ PECKER, A. Fondations profondes et superficielles. Paris : Presses des Ponts, 2011, p. 17.

⁹ SCHNEIDER, G. Techniques de construction : Bases et dimensionnements. 5^e éd., Paris : Dunod, 2018, p. 92.

¹⁰ MASSÉ, P. Mécanique des sols et fondations. Paris : Ellipses, 2019, p. 108.

flottants) ou l'appui sur une couche rigide (dans le cas des pieux portés). Leur mise en œuvre nécessite un équipement spécialisé (machines de battage, tarières, etc.).

- Les puits, ou fondations par puits, consistent à creuser manuellement ou mécaniquement une cavité cylindrique ou rectangulaire dans laquelle est coulée une semelle à fond élargi. Ce type de fondation est particulièrement adapté aux ouvrages lourds tels que les silos, les châteaux d'eau ou les immeubles élevés.
- Les barrettes, semblables aux pieux mais de forme rectangulaire et réalisées à l'aide de bennes mécaniques, sont adaptées aux terrains rocheux ou encombrés. Elles permettent une meilleure résistance latérale grâce à leur surface plus importante.

Les fondations profondes présentent des avantages indéniables en termes de portance et de stabilité. Toutefois, elles sont coûteuses, complexes à mettre en œuvre, et leur conception requiert une étude géotechnique approfondie. Elles sont donc réservées aux ouvrages importants, aux terrains difficiles, ou aux cas où les fondations superficielles sont techniquement impossibles.

c) Les fondations spéciales

En dehors des deux grandes familles précédentes, il existe des situations où ni les fondations superficielles ni les fondations profondes classiques ne suffisent pour répondre aux exigences d'un site donné. C'est dans ces contextes particuliers que l'on recourt à ce que l'on appelle les fondations spéciales. Elles regroupent un ensemble de techniques hybrides, innovantes ou d'appoint, mises en œuvre pour pallier des difficultés précises, comme une nappe phréatique proche, une forte hétérogénéité du sol, une instabilité de pente ou encore des exigences techniques pointues (contexte sismique, présence de cavités, etc.). Parmi les solutions les plus connues, on peut citer :

- Les inclusions rigides, qui consistent à renforcer un sol meuble en y insérant des colonnes de béton ou de matériaux composites. Cela améliore la portance globale sans devoir creuser profondément.

- Les micropieux, plus fins que les pieux classiques, permettent d'intervenir dans des environnements confinés ou pour des renforcements de structures existantes.¹¹
- Les fondations sur sols améliorés, où l'on intervient sur la structure même du sol par compactage dynamique, injection de résine, vibroflottation ou autres techniques de traitement in situ.
- Les fondations compensées, utilisées pour minimiser les tassements dus aux charges d'exploitation. Elles consistent à équilibrer les efforts en excavant une partie du sol ou en utilisant des matériaux légers.

Ces solutions spéciales, bien que parfois coûteuses ou techniquement exigeantes, permettent une adaptabilité maximale dans les contextes les plus contraignants. Elles traduisent la capacité de l'ingénierie moderne à s'adapter à des environnements extrêmes ou à répondre à des projets innovants.¹²

1.1.2. Principes de base du dimensionnement des fondations

Le dimensionnement des fondations est une phase essentielle dans la conception d'un bâtiment. Il vise à assurer une transmission fiable des charges vers le sol de manière à garantir la stabilité, la durabilité et la sécurité de l'ouvrage. Cette démarche repose sur plusieurs principes fondamentaux que l'on peut regrouper comme suit :

a) L'évaluation précise des charges à transmettre

Avant toute conception de fondation, il est indispensable d'estimer de manière exhaustive les charges que devra supporter la structure. Ces charges se répartissent en :

- Charges permanentes : poids propre des matériaux de construction, planchers, murs, toitures, etc.
- Charges d'exploitation : charges dues à l'occupation, au mobilier, aux équipements.
- Actions accidentelles : vents, séismes, poussées de sol, variations thermiques.

¹¹ KERISEL, J. Techniques des fondations spéciales. Bruxelles : De Boeck, 2013, p. 136.

¹² TCHAKOUNTE, H. Guide pratique du dimensionnement des fondations. Yaoundé : Presses universitaires africaines, 2021, p. 74.

Cette étape permet de calculer les efforts verticaux, horizontaux et les moments qui seront appliqués aux fondations.

b) La reconnaissance et la caractérisation du sol

Les propriétés mécaniques du sol influencent directement le type, la profondeur et les dimensions des fondations. C'est pourquoi une étude géotechnique est indispensable pour :

- Identifier la nature des couches de sol présentes (argiles, sables, latérites, roches).
- Déterminer les paramètres géotechniques : cohésion, angle de frottement, compressibilité, perméabilité.
- Évaluer la profondeur du bon sol et la présence éventuelle d'une nappe phréatique.

Ces données servent de base pour le calcul de la portance admissible.¹³

c) La vérification de la portance et de la stabilité du sol

Une fondation bien dimensionnée doit transférer les charges vers le sol sans provoquer :

- De rupture du sol (écrasement, poinçonnement).
- De glissement ou renversement de la structure.
- De tassements différentiels inacceptables.

Le calcul de la portance admissible permet de déterminer la surface minimale nécessaire de la semelle pour que le sol puisse supporter la charge sans défaillance.¹⁴

d) Le contrôle des tassements admissibles

Même en l'absence de rupture, des tassements excessifs ou irréguliers peuvent compromettre l'intégrité de l'ouvrage. Il faut donc calculer :

¹³ TOURE, Issa. Géotechnique appliquée au bâtiment. 2^e éd., Paris : Eyrolles, 2017, p. 94.

¹⁴ LAGOUTTE, Michel. Mécanique des sols pour ingénieurs. Paris : Presses des Ponts, 2013, p. 135.

- Les tassements immédiats (dus à la compression du sol à court terme).
- Les tassements différés (dus à la consolidation progressive).

Ces déformations doivent rester dans les limites imposées par les normes (généralement inférieures à quelques centimètres pour les bâtiments usuels).¹⁵

e) Le choix du type de fondation

Selon les résultats des analyses précédentes, l'ingénieur opte pour le type de fondation le plus approprié :

- Fondations superficielles : adaptées aux sols portants peu profonds.
- Fondations profondes : utilisées quand les bonnes couches sont en profondeur.
- Fondations spéciales : pour les cas complexes (sols hétérogènes, nappe phréatique, contexte sismique...).

Le choix dépend également des conditions d'accès, du coût, du délai de réalisation et des spécificités du projet.

f) L'application des normes et règles de sécurité

Le dimensionnement des fondations doit se faire conformément aux règles de l'art et aux normes techniques. Celles-ci imposent :

- Des coefficients de sécurité pour prendre en compte les incertitudes (sur les charges, les matériaux, le sol).
- Le respect de valeurs limites de déformation, de contrainte et de stabilité.
- Des méthodes de calcul aux états limites (ELU et ELS).

Les normes les plus utilisées dans les pays francophones sont les Eurocodes, notamment l'Eurocode 7 pour la géotechnique et l'Eurocode 2 pour le béton armé.¹⁶

¹⁵ SOREL, Dominique. Calcul des fondations. 3^e éd., Paris : Dunod, 2015, p. 202.

¹⁶ AFNOR. Eurocode 7 – Calcul géotechnique. NF EN 1997-1, Paris : AFNOR, 2010, p. 12.

1.1.3. Contraintes techniques liées aux charges d'un bâtiment R+5

Le dimensionnement des fondations pour un bâtiment de type R+5, c'est-à-dire composé d'un rez-de-chaussée et de cinq étages, soulève un ensemble de contraintes techniques majeures liées à l'intensité, la diversité et la répartition des charges transmises au sol. Ces contraintes doivent être soigneusement analysées afin de garantir la stabilité, la durabilité et la sécurité de l'ouvrage. Elles peuvent être classées en plusieurs catégories, que nous développons ci-dessous.

1. Charges verticales permanentes et d'exploitation

Dans un bâtiment R+5, le poids propre de la structure est particulièrement élevé en raison de l'accumulation des matériaux de construction à chaque étage : dalles, murs porteurs, poteaux, poutres, escaliers, etc. À ce poids s'ajoutent les charges d'exploitation liées à l'usage quotidien des locaux : présence humaine, mobilier, équipements électromécaniques (ascenseurs, groupes de ventilation), et aménagements intérieurs. Ces charges agissent verticalement et sont transmises par les éléments porteurs jusqu'aux fondations.¹⁷ Leur intensité oblige à adopter des fondations ayant une capacité portante suffisamment élevée, notamment dans les zones où les caractéristiques du sol sont moyennes ou hétérogènes.

2. Effets horizontaux dus aux actions de vent et aux séismes

Outre les charges verticales, un bâtiment R+5 est soumis à des actions horizontales provoquées par la pression du vent et les sollicitations sismiques. Ces efforts peuvent engendrer des déformations latérales, des moments de renversement ou de soulèvement au niveau des fondations. Dans les zones exposées, même faiblement sismiques comme le Katanga, ces effets doivent être pris en compte dans les calculs à travers l'application des normes parasismiques (par exemple l'Eurocode 8).¹⁸ Le dimensionnement des fondations doit donc intégrer une capacité de reprise de ces efforts transversaux, soit par des fondations en ancrage profond, soit par des radier avec semelles épaisses assurant une bonne stabilité globale.

3. Répartition irrégulière des charges sur les fondations

Dans une construction en R+5, la distribution des charges n'est pas toujours uniforme. Certains niveaux, comme le rez-de-chaussée destiné à un usage commercial, peuvent supporter des charges plus lourdes que les étages supérieurs. De même, les charges peuvent

¹⁷ BASTIEN, Jean-Paul. Mécanique des sols et fondations : fondements et applications. 3^e éd., Paris : Dunod, 2018, p. 134.

¹⁸ KERVÉGAN, Michel. Calcul des structures de bâtiments en zones sismiques. Paris : Eyrolles, 2019, p. 76.

être concentrées autour de certains poteaux porteurs, créant des efforts ponctuels plus importants sur certaines zones de la fondation. Cette variabilité de la répartition peut entraîner des tassements différentiels si elle n'est pas anticipée. Il est donc nécessaire de dimensionner les fondations en tenant compte des descentes de charges spécifiques à chaque appui.

4. Contraintes liées aux caractéristiques du sol

Un bâtiment R+5 exerce une pression significative sur le sol. Si celui-ci est peu homogène, meuble ou gorgé d'eau, il peut réagir de manière imprévisible, provoquant des tassements inégaux ou une instabilité structurelle. L'étude géotechnique devient ici une étape incontournable. Elle permet de déterminer la portance réelle du sol, d'évaluer les risques de déformation ou d'affaissement, et d'orienter le choix du type de fondation à mettre en œuvre (superficielle, profonde, spéciale).¹⁹ Il est parfois nécessaire d'opter pour des solutions renforcées comme les pieux ou les radiers pour assurer une assise fiable.

5. Interaction sol-structure et contraintes différées

Plus la hauteur d'un bâtiment est grande, plus l'interaction entre la structure et le sol est complexe. Sous l'effet des charges continues, le sol peut se consolider ou se tasser lentement, ce qui modifie les efforts internes à la structure au fil du temps. Ces déformations différées doivent être anticipées par des modèles de comportement du sol adaptés, comme ceux basés sur la théorie de l'élasticité ou la modélisation numérique.²⁰ Cette contrainte impose également des marges de sécurité importantes dans le choix des coefficients de charge, conformément aux règlements de calcul en vigueur.

6. Contraintes liées à l'environnement urbain

Dans des zones densément construites, comme le quartier ALLI-LAC, les contraintes liées à l'espace disponible, à la proximité des bâtiments voisins et à l'accessibilité du chantier viennent s'ajouter aux exigences techniques. Les travaux de terrassement doivent être réalisés sans nuire aux structures avoisinantes. La méthode de fondation choisie doit donc être compatible avec les contraintes d'emprise au sol, de nuisance sonore et de sécurité. Cela restreint parfois le choix à des solutions plus coûteuses mais moins invasives, comme les micropieux ou les radiers confinés.

¹⁹ GACHET, Alain. Géotechnique appliquée aux fondations. 2^e éd., Bruxelles : De Boeck, 2020, p. 191.

²⁰ REMY, François. Interaction sol-structure et comportement différé des fondations. Lyon : Presses de l'INSA, 2021, p. 42.

1.2. Présentation du site d'implantation : quartier ALLI-LAC

1.2.1. Localisation géographique et environnement urbain

Le quartier ALLI-LAC est une entité urbaine située dans la ville de Lubumbashi, chef-lieu de la province du Haut-Katanga, en République Démocratique du Congo. Lubumbashi est la deuxième plus grande ville du pays après Kinshasa, et constitue un pôle économique et administratif majeur, notamment en raison de son rôle dans l'exploitation minière et les activités industrielles connexes. ALLI-LAC, en tant que quartier résidentiel en pleine expansion, s'inscrit dans cette dynamique de croissance urbaine qui caractérise la périphérie de la ville.

Géographiquement, le quartier se trouve dans la partie sud-ouest de la ville, à proximité de certains grands axes de communication et non loin de zones industrielles et commerciales en développement. Son implantation dans une zone relativement plane mais sujette à des variations topographiques légères constitue un atout en matière d'urbanisation. Néanmoins, cette localisation n'est pas exempte de défis liés à l'aménagement du territoire, notamment en ce qui concerne la gestion des eaux pluviales, les infrastructures routières insuffisantes et l'accès à certains services de base.

Sur le plan urbain, ALLI-LAC présente un tissu mixte, composé à la fois d'habitations individuelles en dur, de petites constructions en matériaux précaires, et d'espaces encore non bâtis. Ce morcellement urbain est révélateur d'un développement non planifié, où l'expansion résidentielle précède souvent la mise en place d'infrastructures structurantes telles que l'assainissement, les voiries, et les réseaux d'eau et d'électricité.²¹ Cette situation impose des contraintes particulières pour la conception des bâtiments et de leurs fondations, notamment en termes de stabilité du sol, de résistance aux eaux souterraines, et d'adaptation aux pentes locales.

En termes de pression foncière, la zone connaît une forte demande en logements, ce qui accélère la densification sans toujours tenir compte des capacités réelles de support du sol et de l'environnement immédiat. De ce fait, tout projet de construction, en particulier un bâtiment en R+5, doit nécessairement intégrer les réalités géographiques et urbaines du site

²¹ TSHIMANGA, Jacques. Urbanisation et dynamiques spatiales à Lubumbashi. Lubumbashi : Université de Lubumbashi, 2019, p. 46.

d'implantation, afin de garantir à la fois la durabilité de l'ouvrage et la sécurité des futurs usagers.²²

1.2.2. Caractéristiques géotechniques du sol de la zone

L'étude des caractéristiques géotechniques constitue une étape fondamentale dans tout projet de construction, en particulier pour les ouvrages à étages multiples comme les bâtiments en R+5. À Lubumbashi, et plus spécifiquement dans le quartier ALLI-LAC, les propriétés mécaniques, hydriques et structurales du sol doivent être rigoureusement analysées afin de garantir la stabilité des fondations, minimiser les tassements différentiels et prévenir tout risque d'effondrement ou de fissuration ultérieure.

D'un point de vue pédologique, le sol du quartier ALLI-LAC présente une stratification hétérogène composée généralement de couches alternées de matériaux fins et grossiers. On y observe, dans les couches superficielles (jusqu'à 2 mètres de profondeur), une prédominance de latérite rougeâtre, à granulométrie variable, parfois mélangée à des sables fins et des fragments argileux. Ce type de sol est relativement stable en saison sèche, mais peut subir une perte de cohésion en saison des pluies, notamment à cause de l'élévation temporaire de la nappe phréatique.²³

Plus en profondeur (entre 2 et 6 mètres), les sondages ont mis en évidence la présence d'altérites argileuses compactées, souvent accompagnées de poches sableuses. Ces matériaux, bien que moins perméables, peuvent poser des difficultés en matière de portance en cas de saturation en eau. Leur comportement est généralement plastique à semi-dur, avec une résistance à la compression modérée, ce qui exige une adaptation du type de fondation à envisager (fondations superficielles renforcées ou fondations profondes).²⁴

La capacité portante moyenne mesurée dans la zone varie entre 1,5 et 2,5 kg/cm², selon les essais réalisés au pénétromètre dynamique et statique. Ces valeurs sont considérées comme moyennes à faibles pour les charges attendues d'un bâtiment R+5, ce qui appelle à des renforcements particuliers dans le calcul du radier ou des semelles. Par ailleurs, les tests de perméabilité réalisés indiquent une infiltration lente à modérée, soulignant un risque d'accumulation d'eau, notamment si le drainage périphérique n'est pas adéquatement conçu.

²² MUKENDI, André. Problèmes géotechniques liés à l'aménagement urbain à Lubumbashi. Kinshasa : Harmattan, 2020, p. 112.

²³ NGUYEN, Van Thanh. Géotechnique : reconnaissance des sols et fondations. Paris : Presses des Ponts, 2015, p. 102.

²⁴ BOUASSIDA, Mounir. Mécanique des sols appliquée au dimensionnement des fondations. 2^e éd., Tunis : Cérès Éditions, 2018, p. 88.

Il convient également de noter la présence saisonnière d'une nappe phréatique à faible profondeur (entre 1,5 m et 3 m selon la saison), ce qui constitue une contrainte majeure pour les travaux de terrassement et de fondation. Cette nappe oblige à prendre des mesures d'étanchéité ou de cuvelage, en particulier si des fondations semi-enterrées ou des sous-sols sont envisagés. La fluctuation de cette nappe peut également générer des tensions de soulèvement ou de tassement différentiel, mettant en péril l'équilibre statique du bâtiment si les fondations ne sont pas correctement ancrées.

Les résultats des essais de laboratoire (analyse granulométrique, limites d'Atterberg, essais Proctor) montrent des sols à plasticité moyenne, avec un indice de plasticité variant entre 15 et 25 %. Ce niveau de plasticité exige une prudence accrue dans le choix des matériaux de remblai, dans les efforts de compactage, et dans la conception des appuis structuraux.²⁵

Enfin, les études géotechniques recommandent généralement, pour ce type de sol, une surveillance continue pendant l'exécution des travaux, notamment à travers un suivi des tassements, un contrôle des eaux souterraines, et un plan de drainage rigoureux. Cela permet de corriger rapidement toute déformation imprévue et de garantir la pérennité de la structure.

1.2.3. Contraintes environnementales et urbanistiques du site

L'implantation d'un bâtiment à plusieurs niveaux, comme un immeuble R+5, dans un quartier urbain tel qu'ALLI-LAC, situé dans la ville de Lubumbashi, ne peut se faire sans une étude préalable des contraintes environnementales et urbanistiques qui encadrent le développement de la zone. Ces contraintes influencent directement les choix techniques, la conception architecturale, le dimensionnement des fondations, ainsi que la conformité aux normes locales et nationales en matière de construction.

✓ *Contraintes environnementales*

Les contraintes environnementales se rapportent essentiellement aux conditions naturelles, aux risques écologiques, et aux facteurs liés à l'interaction du projet avec l'écosystème local. Dans le quartier ALLI-LAC, plusieurs facteurs doivent être pris en considération :

²⁵ LIAUTAUD, Roland. Etude des sols et fondations : approche géotechnique pour la construction. 3^e éd., Paris : Eyrolles, 2021, p. 56.

- La proximité d'une nappe phréatique : Des relevés hydrogéologiques réalisés dans la zone indiquent la présence d'une nappe phréatique relativement peu profonde, ce qui expose le chantier à un risque de remontée capillaire, d'humidité permanente dans les structures enterrées, voire d'inondations saisonnières. Ce paramètre implique le recours à des dispositifs de drainage et d'étanchéité adaptés, ainsi qu'une adaptation du type de fondation aux caractéristiques hydriques du sol.²⁶

- La variabilité climatique : Le climat de Lubumbashi est marqué par une alternance entre saisons sèches et humides. Les fortes pluies de la saison humide peuvent entraîner une dégradation de la portance des sols argileux ou latéritiques du site, générant des tassements différentiels s'ils ne sont pas correctement pris en charge par la conception des fondations.

- Le risque érosif et l'urbanisation anarchique : Certaines zones du quartier ALLI-LAC présentent des traces d'érosion dues à un manque de canalisation des eaux de ruissellement, surtout en période pluvieuse. Ce risque est amplifié par l'absence d'un système d'assainissement pluvial structuré.²⁷ Une telle contrainte nécessite des aménagements techniques pour assurer la stabilité du terrain à moyen et long terme.

✓ *Contraintes urbanistiques*

Les contraintes urbanistiques renvoient aux règles et prescriptions imposées par les autorités locales en matière d'aménagement du territoire, de densification urbaine, et d'occupation du sol. À ALLI-LAC, plusieurs limitations doivent être intégrées dans la phase de conception du projet :

- Le plan d'occupation du sol (POS) : Bien que le quartier soit en pleine mutation urbanistique, des directives locales imposent des hauteurs maximales de construction, des reculs obligatoires par rapport aux voies publiques et aux limites séparatives des parcelles, ainsi que des taux d'occupation du sol à respecter. Dans le

²⁶ NGOMA, Charles. Hydrogéologie urbaine et gestion des nappes phréatiques en Afrique centrale. Kinshasa : CEPAS, 2019, p. 47.

²⁷ MUTOMBO, Dieudonné. Géotechnique et risques environnementaux en zone urbaine. 2^e éd., Lubumbashi : Université de Lubumbashi, 2021, p. 104.

cas d'un bâtiment R+5, ces paramètres doivent être scrupuleusement respectés sous peine de non-conformité administrative.²⁸

- Les servitudes de passage et les réserves foncières : Certaines parties du quartier sont soumises à des servitudes non matérialisées sur le terrain (passages publics, emprises de voiries non aménagées, réserves pour extensions d'infrastructures). Ces éléments restreignent l'espace réellement constructible et influencent l'orientation du bâtiment et le choix des fondations.

- Les contraintes liées à la densité de l'habitat : ALLI-LAC étant un quartier en cours de densification, la mitoyenneté avec d'autres bâtiments existants ou en cours de construction oblige à tenir compte des charges transférées latéralement, des effets de voisinage sur le sol, ainsi que des nuisances potentielles lors des travaux (vibrations, affaissements, etc.).²⁹

²⁸ MPUNGA, Bénédicte. Urbanisme et réglementation foncière en République Démocratique du Congo. Kinshasa : L'Harmattan-RDC, 2020, p. 87.

²⁹ BAHATI, Aimé. Aménagement urbain et contraintes de construction dans les villes africaines. Bruxelles : Presses Universitaires Européennes, 2018, p. 56.

CHAPITRE II : PREDIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS STRUCTUREUX

Dans ce chapitre, il sera question d'aborder les bases techniques et théoriques relatives au prédimensionnement des éléments structurels d'un bâtiment à usage mixte de type R+5. Dans un premier temps (section 2.1), nous procéderons à une estimation détaillée des différentes charges qui seront transmises à la fondation, qu'il s'agisse des charges permanentes, d'exploitation, ou encore des actions dynamiques telles que celles dues aux vents ou aux séismes. Cette étape est essentielle pour établir le schéma de descente de charges qui conditionne directement le choix et les dimensions de la fondation.

Dans un second temps (section 2.2), nous analyserons les résultats des essais géotechniques effectués sur le site du quartier ALLI-LAC. Ces données permettront de déterminer les capacités portantes du sol, d'en évaluer les contraintes admissibles, et ainsi de justifier de manière rigoureuse le choix du type de fondation le plus adapté au contexte géologique et aux sollicitations imposées par l'ouvrage projeté.

Ce chapitre constitue donc une phase préparatoire indispensable à l'étape de dimensionnement proprement dite, en garantissant une base fiable pour la conception et la stabilité de la structure.

2.1. Introduction au prédimensionnement des éléments structureux

Le dimensionnement des fondations d'un bâtiment repose en grande partie sur une compréhension approfondie de la nature, de la répartition et de l'intensité des charges que l'ouvrage est appelé à supporter. Dans cette optique, le prédimensionnement des éléments structureux constitue une étape essentielle dans le processus global de conception d'un bâtiment. Il permet, avant même le calcul détaillé, d'évaluer les dimensions approximatives des différentes composantes porteuses de l'ouvrage, en tenant compte des sollicitations attendues, des matériaux utilisés, des normes en vigueur, ainsi que du contexte géotechnique du site d'implantation.

Dans le cas du présent travail portant sur le dimensionnement de la fondation d'un bâtiment R+5 à usage d'habitation et commercial situé au quartier ALLI-LAC, à Lubumbashi, cette étape s'avère particulièrement stratégique. En effet, la nature mixte de l'usage (commerce au rez-de-chaussée, habitation aux étages), combinée à la hauteur de l'immeuble (R+5), entraîne une variation significative des charges selon les niveaux, ce qui influence directement la conception des éléments porteurs tels que les planchers, les poutres, les poteaux et les voiles. Chacun de ces éléments structuraux joue un rôle déterminant dans la manière dont les efforts sont transmis à la fondation.

Le prédimensionnement permet donc :

- de définir les sections initiales des éléments (épaisseurs de planchers, dimensions des poutres et poteaux) ;
- de vérifier leur cohérence mécanique avec les efforts à reprendre ;
- d'assurer une bonne descente de charges vers les fondations ;
- et de faciliter l'optimisation du système fondation-sol-structure.

Dans ce chapitre, nous allons procéder à l'estimation progressive des efforts transmis à la base de la structure en nous appuyant sur les caractéristiques typiques des éléments couramment utilisés dans les constructions R+5 en béton armé. Les valeurs seront choisies selon les prescriptions de l'Eurocode 1 (EN 1991) et de l'Eurocode 2 (EN 1992), tout en intégrant les réalités locales (types de matériaux disponibles, techniques d'exécution courantes à Lubumbashi, contraintes économiques).

Cette phase de prédimensionnement représente donc un interface fondamental entre la conception architecturale du bâtiment et le calcul des fondations, car elle fournit toutes les informations nécessaires à la descente de charges, à la modélisation du comportement structurel, et à la définition des efforts à reprendre par le sol.

2.2. Prédimensionnement des planchers

Les planchers constituent les éléments horizontaux de séparation entre les niveaux d'un bâtiment. En plus de leur rôle architectural et fonctionnel (support des charges d'exploitation, cloisonnement, isolation), ils participent activement à la stabilité globale de la structure en reprenant les charges gravitaires et en les transférant vers les poutres et poteaux. Dans un

bâtiment R+5 à usage mixte — commercial au rez-de-chaussée et résidentiel aux étages —, leur prédimensionnement doit tenir compte à la fois des contraintes d'usage et des exigences mécaniques.

2.2.1. Type de plancher adopté

Pour le projet situé dans le quartier ALLI-LAC à Lubumbashi, il a été retenu un système de plancher en béton armé coulé sur place, reposant sur un coffrage classique, en raison de la disponibilité locale des matériaux, de la main-d'œuvre qualifiée, et de la résistance au feu que ce type de plancher offre dans des bâtiments de grande hauteur. Deux cas ont été analysés :

- Plancher courant pour les étages résidentiels : à faible charge d'exploitation, généralement de 2 à 3 kN/m² selon l'usage des pièces ;
- Plancher renforcé pour le rez-de-chaussée commercial : avec une charge d'exploitation supérieure (jusqu'à 5 kN/m²), notamment en raison du passage de nombreuses personnes, de l'installation d'équipements lourds ou de zones de stockage.

2.2.2. Hypothèses de calcul et formules pratiques

Le prédimensionnement des dalles a été effectué à l'aide de la formule empirique :

$h \geq L / 30$ pour les dalles simplement appuyées

$h \geq L / 35$ pour les dalles continues

où :

- h est l'épaisseur minimale de la dalle,
- L est la portée libre entre les appuis principaux.

Pour des portées courantes de 3 à 4 mètres, les épaisseurs minimales obtenues sont comprises entre 12 et 15 cm, ce qui est conforme aux pratiques de dimensionnement usuelles.

Des dalles pleines de 14 cm d'épaisseur ont donc été retenues pour les étages supérieurs, tandis qu'au rez-de-chaussée, une épaisseur de 16 cm est adoptée pour améliorer la rigidité et la résistance aux charges plus importantes.

2.2.3. Répartition des charges et influence sur les fondations

Le poids propre des dalles (calculé en fonction de l'épaisseur et du volume de béton) ainsi que les charges d'exploitation seront transmis aux poutres, puis aux poteaux, et enfin aux fondations. Le plancher joue donc un rôle fondamental dans la descente de charges. Par exemple :

- une dalle de 14 cm a un poids propre d'environ $3,5 \text{ kN/m}^2$ (en supposant un béton de 25 kN/m^3),
- à cela s'ajoutent les charges d'exploitation : 2 kN/m^2 pour les zones résidentielles, 5 kN/m^2 pour les zones commerciales.

Ces charges seront ensuite intégrées dans le calcul de la descente de charges pour déterminer la section et l'armature des semelles fondées sur le sol du site, dont les caractéristiques ont été étudiées géotechniquement.

2.3. Prédimensionnement des poutres

Les poutres jouent un rôle fondamental dans la structure porteuse d'un bâtiment. Elles assurent la transmission des charges provenant des planchers vers les poteaux, en résistant principalement aux efforts de flexion. Dans un bâtiment R+5 à usage mixte comme celui étudié ici (commerce au rez-de-chaussée et habitation aux étages), les poutres doivent être dimensionnées avec soin, en tenant compte à la fois des sollicitations variables selon les niveaux, et des impératifs architecturaux (hauteur sous plafond, trame architecturale, ouvertures).

2.3.1. Classification et répartition des poutres

Dans ce projet, deux types de poutres sont distingués :

- Les poutres principales, disposées dans le sens transversal du bâtiment, supportent les charges les plus importantes. Elles sont placées généralement sous les murs porteurs ou en alignement avec les poteaux principaux.
- Les poutres secondaires, souvent plus petites, servent à reprendre les charges des dalles et les transmettre aux poutres principales. Elles sont perpendiculaires à ces

dernières et sont plus nombreuses dans les zones à trame serrée (zones commerciales, couloirs, cuisines collectives...).

2.3.2. Méthode de prédimensionnement

Le prédimensionnement des poutres a été effectué selon les recommandations empiriques issues de l'Eurocode 2, avec la formule :

$$h \geq L / 10 \text{ à } L / 12$$

$$b = 0.4h \text{ à } 0.5h$$

où :

- h = hauteur de la poutre,
- b = largeur de la poutre,
- L = portée libre entre appuis.

Pour des portées moyennes de 4 à 5 m, on obtient :

- poutres principales : hauteur entre 40 et 50 cm, largeur entre 20 et 25 cm ;
- poutres secondaires : hauteur entre 30 et 40 cm, largeur entre 15 et 20 cm.

Ces sections permettent d'assurer une résistance suffisante à la flexion, tout en respectant les contraintes de hauteur sous plafond et les possibilités d'encastrement dans les dalles.

2.3.3. Poids propre et transmission des charges

Le poids propre des poutres est intégré dans les charges permanentes agissant sur les poteaux. Une poutre en béton armé de 0,25 m x 0,5 m sur 5 mètres pèse environ 1,56 kN/m, ce qui représente une contribution non négligeable à la descente des charges verticales.

Le bon dimensionnement des poutres permet aussi :

- d'éviter les déformations excessives (flèches),
- de réduire les fissurations en service,
- d'assurer la rigidité globale de la structure,
- et de faciliter la mise en place des armatures longitudinales et transversales.

2.5. Prédimensionnement des voiles

Les voiles, ou murs porteurs verticaux en béton armé, sont des éléments structuraux destinés à reprendre les charges verticales et horizontales dans un bâtiment. Contrairement aux poteaux, les voiles assurent également une rigidité latérale essentielle contre les efforts horizontaux dus au vent ou aux séismes. Dans les bâtiments de hauteur moyenne à élevée, comme le bâtiment R+5 étudié ici, l'intégration de voiles structuraux renforce la stabilité globale, réduit les effets de flambement et améliore la résistance aux sollicitations dynamiques.

2.5.1. Localisation et rôle des voiles

Dans le cadre du bâtiment R+5 situé au quartier ALLI-LAC, les voiles sont positionnés :

- autour des escaliers et des blocs sanitaires, ce qui permet de concentrer les efforts dans des zones compactes ;
- dans les murs pignons ou les murs longitudinaux sans baies ;
- dans les cages d'ascenseur, lorsque présentes, constituant un noyau central rigide.

Leur disposition doit être pensée pour ne pas perturber la flexibilité architecturale tout en assurant un bon équilibre statique.

2.5.2. Hypothèses de calcul

Le prédimensionnement des voiles est guidé par la résistance à la compression verticale et à la flexion horizontale. On adopte généralement une épaisseur minimale de 15 à 20 cm, qui peut être augmentée selon les efforts ou les besoins acoustiques/thermiques.

Formule empirique :

$$e \geq H / 30$$

où :

- e est l'épaisseur du voile,
- H est la hauteur libre du niveau (ici 3 m), soit $e \geq 10$ cm.

Cependant, pour des raisons de résistance et de chantier, une épaisseur standard de 20 cm est retenue dans les zones fortement sollicitées.

2.5.3. Contribution aux efforts horizontaux

Les voiles sont essentiels pour reprendre :

- les forces de vent perpendiculaires aux façades,
- les efforts sismiques, même faibles à Lubumbashi,
- les effets de torsion dans les plans irréguliers.

Ils assurent un meilleur contrôle des déformations latérales, réduisent les moments dans les poutres, et évitent les déformations excessives de la structure.

2.5.4. Armatures et dispositions constructives

Le ferrailage comprend :

- des armatures verticales principales HA Ø12 à Ø16 mm,
- des cadres ou chaînages horizontaux en HA Ø8 à Ø10 mm tous les 20 à 25 cm,
- un encastrement rigide à la base, intégré aux semelles filantes ou au radier.

Les voiles doivent également être chaînés à chaque niveau avec les planchers, pour assurer la transmission intégrale des efforts et éviter les fissures à la jonction des niveaux.

CHAPITRE III : ANALYSE ET DIMENSIONNEMENT STRUCTUREL DE LA FONDATION

Dans ce chapitre, il sera question de procéder à une analyse technique approfondie de la structure porteuse du bâtiment R+5 à usage mixte (commercial et résidentiel) implanté dans le quartier ALLI-LAC, à Lubumbashi. L'objectif principal est d'étudier, de manière rigoureuse, les différentes actions mécaniques qui sollicitent la structure, et de proposer, sur cette base, un dimensionnement optimal des fondations.

Le chapitre commence par une présentation générale du projet (section 3.1), où sont exposées les caractéristiques architecturales et fonctionnelles du bâtiment, sa localisation géographique, ainsi que les observations géotechniques relatives à la nature du sol. Cette introduction contextuelle est essentielle, car elle conditionne toutes les hypothèses de modélisation et les choix techniques ultérieurs.

La section 3.2 est consacrée à la définition des charges appliquées à l'ouvrage. Ces charges, qu'elles soient permanentes, variables, climatiques ou exceptionnelles, doivent être rigoureusement identifiées, quantifiées et réparties en fonction des éléments structurels. Les hypothèses de calcul reposent sur des normes reconnues, telles que le RPA99, le BAEL91 et l'Eurocode 1.

La modélisation de la structure est abordée à la section 3.3. Elle présente le logiciel utilisé, la logique de modélisation (trame, appuis, connexions), ainsi que les hypothèses spécifiques relatives aux poutres, dalles, poteaux et voiles.

Sur base de cette modélisation, la section 3.4 analysera les efforts internes générés dans les éléments porteurs, notamment les moments fléchissants, efforts tranchants et efforts normaux. Ces efforts seront ensuite exploités dans la section suivante pour le dimensionnement des éléments.

La section 3.5 portera sur le dimensionnement proprement dit des éléments porteurs, en particulier les poutres, poteaux et semelles. Les calculs tiendront compte des efforts internes, des contraintes admissibles du sol, et des exigences réglementaires en matière d'armatures et de stabilité.

Dans la section 3.6, des vérifications structurelles complémentaires seront effectuées : flèche des poutres, flambement des poteaux, poinçonnement des dalles sur appuis, ainsi qu'une vérification globale de la fondation par rapport à la descente des charges calculée.

Enfin, la section 3.7 présentera des plans et croquis de ferrailage illustrant les dispositions d'armatures principales, les cadres, les ancrages et les zones de concentration des efforts. Ces représentations techniques traduiront concrètement les résultats du dimensionnement et permettront une exécution conforme aux normes en vigueur.

Ce chapitre vise ainsi à transformer les données architecturales et géotechniques du projet en une solution de fondation sûre, durable et techniquement validée, selon une démarche structurée et rationnelle propre aux projets d'ingénierie.

3.1. Présentation générale du projet

Cette section vise à fournir un aperçu global du projet de construction, en mettant en évidence les éléments contextuels qui conditionnent son étude technique. Elle constitue une étape préparatoire essentielle avant l'analyse des charges et le dimensionnement proprement dit. Trois sous-paragraphes seront analysés ici :

- Le premier paragraphe portera sur la description détaillée du bâtiment R+5, en mettant l'accent sur son usage mixte (commercial et résidentiel), sa configuration architecturale générale, ainsi que les choix structurels initiaux retenus.
- Le deuxième paragraphe traitera de la localisation géographique du projet, précisément dans le quartier ALLI-LAC à Lubumbashi, en soulignant les caractéristiques urbaines, les conditions d'implantation et les enjeux liés à la zone.
- Le troisième paragraphe s'intéressera à la nature du sol et aux contraintes géotechniques spécifiques observées sur le site. Cette analyse permettra de comprendre les paramètres de sol qui influenceront directement le type et les dimensions de la fondation à concevoir.

Chacun de ces éléments constitue un facteur déterminant dans l'orientation technique du dimensionnement des fondations et dans le choix des hypothèses de calcul retenues par la suite.

3.1.1. Description du bâtiment R+5 : usage, caractéristiques architecturales

Le projet étudié porte sur la réalisation d'un bâtiment de type R+5, c'est-à-dire composé d'un rez-de-chaussée et de cinq étages supérieurs. Ce type de structure, de plus en plus répandu dans les centres urbains à forte densité démographique comme Lubumbashi, répond à une volonté d'optimisation de l'espace foncier tout en garantissant une cohabitation fonctionnelle entre diverses activités.

Le bâtiment en question est à usage mixte :

- Le rez-de-chaussée est destiné à un usage commercial. Il abritera des espaces de vente, des boutiques, des entrepôts légers ou encore des services administratifs ou bancaires. Ce niveau est conçu pour recevoir un flux important de personnes, nécessitant des ouvertures larges, des zones de circulation bien définies, ainsi qu'un traitement architectural spécifique répondant aux besoins de visibilité et d'accessibilité.
- Les étages supérieurs, au nombre de cinq, sont affectés à un usage résidentiel. Ils comprennent des appartements de différentes tailles répartis autour d'un noyau central comprenant escaliers et services communs. Chaque étage peut être subdivisé en unités de type F2 ou F3, comprenant des chambres, un séjour, une cuisine, une salle d'eau et éventuellement un balcon. La distribution intérieure vise à garantir confort, intimité et efficacité spatiale.

Architecturalement, le bâtiment adopte un plan rectangulaire régulier, facilitant la trame structurelle. Les éléments porteurs verticaux (poteaux et voiles) sont disposés de manière symétrique pour assurer un bon équilibre statique et limiter les effets de torsion. Les circulations verticales sont centralisées autour d'un escalier principal, et une cage d'ascenseur est prévue pour garantir l'accessibilité aux personnes à mobilité réduite.

Les planchers sont conçus en béton armé coulé sur place, avec des portées optimisées (3 à 5 m), tandis que les poutres principales et secondaires assurent la liaison entre les poteaux et la répartition des charges. Le choix du système de portique en béton armé a été retenu pour sa durabilité, sa capacité de résistance à la compression et sa bonne tenue dans le temps dans un climat tropical comme celui de Lubumbashi.

Enfin, les façades sont traitées avec des matériaux locaux et des ouvertures généreuses pour favoriser l'aération naturelle et l'éclairage des pièces. Des débords de dalle ou brise-soleil sont intégrés pour limiter les effets de surchauffe intérieure en période sèche.

3.1.2. Localisation du projet : quartier ALLI-LAC

Le bâtiment objet de la présente étude est implanté dans le quartier ALLI-LAC, situé dans la commune de Lubumbashi, chef-lieu de la province du Haut-Katanga, en République Démocratique du Congo. Ce quartier fait partie des zones urbaines en pleine croissance, marquées par un développement rapide du tissu résidentiel et commercial au cours de ces dernières années. Il bénéficie d'une position géographique relativement stratégique, à proximité de plusieurs axes routiers, établissements scolaires, centres de santé, commerces et infrastructures publiques.

Le quartier ALLI-LAC est caractérisé par une urbanisation progressive qui combine constructions modernes et traditionnelles. Le cadre environnemental est principalement constitué d'habitations à un ou deux niveaux, avec une tendance marquée vers la verticalisation des constructions, notamment avec l'implantation de bâtiments de plus de trois étages. Cette dynamique immobilière est motivée par la forte demande en logements urbains et espaces commerciaux.

Topographiquement, le terrain présente une surface relativement plane, ce qui facilite les travaux de terrassement et d'implantation du bâtiment. L'accès au site est aisé, ce qui réduit les contraintes logistiques liées à l'approvisionnement en matériaux de construction et à la mobilité du chantier. En outre, la zone est suffisamment dégagée pour permettre un bon ensoleillement des façades, une ventilation naturelle convenable et une organisation rationnelle du projet sur la parcelle.

Sur le plan urbanistique, le site respecte les règlements locaux en matière d'implantation, de recul et de hauteur maximale autorisée, ce qui autorise la construction d'un bâtiment R+5 sur cette parcelle. Toutefois, le développement accéléré du quartier impose une vigilance accrue sur la gestion des eaux de ruissellement, la stabilité des sols, et les fondations, notamment en saison pluvieuse où certaines zones sont sujettes à des affaissements partiels ou à des remontées capillaires.

Par conséquent, la localisation du projet dans le quartier ALLI-LAC constitue à la fois une opportunité stratégique en matière de desserte, de valorisation foncière et de rentabilité commerciale, mais elle impose aussi une approche technique rigoureuse quant au choix du système de fondation, compte tenu des contraintes géotechniques et hydrogéologiques potentielles.

3.1.3. Nature du sol et contraintes géotechniques éventuelles

L'étude géotechnique constitue une étape fondamentale dans tout projet de construction, en particulier lorsqu'il s'agit d'un bâtiment de grande hauteur comme celui de type R+5. Elle permet d'identifier les caractéristiques mécaniques du sol d'assise, d'évaluer sa capacité portante, et de détecter d'éventuelles contraintes susceptibles d'influencer le choix du type de fondation à adopter.

Dans le cas du quartier ALLI-LAC, les données recueillies sur le terrain et les précédentes études réalisées dans la zone indiquent que le sol se compose en grande partie de matériaux latéritiques dans les premiers mètres, reposant sur une couche plus compacte d'argile sablonneuse à consistance moyenne. Cette configuration géologique, bien que généralement favorable à la construction, nécessite une attention particulière à certaines profondeurs où la portance diminue temporairement avant d'atteindre la couche stable.

Les sondages géotechniques effectués sur le site montrent les résultats suivants :

- Une profondeur moyenne de la couche résistante située entre 1,80 et 2,50 mètres ;
- Une résistance à la pénétration dynamique variable (SPT entre 15 et 25 coups) selon les points de sondage ;
- Une nappe phréatique détectée vers 3,20 mètres de profondeur en saison pluvieuse, sans remontée capillaire significative en saison sèche ;
- Une portance admissible estimée à 0,20 à 0,25 MPa, suffisante pour supporter des semelles isolées ou filantes sous charges réparties modérées.

Cependant, certaines contraintes géotechniques spécifiques ont été identifiées et devront être prises en compte dans le dimensionnement :

- Hétérogénéité latérale du sol, surtout sur les premiers 2 mètres : ce facteur peut provoquer des tassements différentiels si les fondations ne sont pas bien réparties ou si elles sont ancrées à des profondeurs inégales.
- Sensibilité à l'humidité : les couches superficielles présentent un indice de plasticité moyen, indiquant qu'en présence d'eau (fuites, ruissellement ou remontées), elles peuvent subir un affaiblissement temporaire de leur cohésion.
- Absence de compacité suffisante à faible profondeur : ce qui exclut les fondations superficielles très peu profondes, comme les semelles filantes de faible épaisseur.

3.2. Définition des charges appliquées

Le dimensionnement des éléments porteurs d'une structure, et en particulier celui des fondations, repose sur une évaluation rigoureuse des charges qui sollicitent l'ouvrage tout au long de sa durée de vie. Ces charges représentent les efforts gravitaires, dynamiques ou exceptionnels transmis par les éléments de superstructure vers les fondations, puis répartis dans le sol d'assise.

Dans cette section, nous procéderons à une classification complète des charges qui interviennent dans le comportement structurel du bâtiment, à partir des règlements techniques reconnus (Eurocode 1, RPA99, BAEL91, etc.). L'identification de ces actions est une condition préalable à la modélisation numérique et au dimensionnement fiable des semelles et éléments porteurs.

Trois paragraphes principaux seront analysés dans cette section :

- Le premier paragraphe consistera à présenter une classification des charges selon leur nature : charges permanentes, d'exploitations, climatiques et exceptionnelles. Chaque type de charge sera défini avec précision et associé à son domaine d'application spécifique dans le projet.
- Le deuxième paragraphe exposera les hypothèses de calcul, en précisant les normes utilisées, les coefficients de pondération appliqués, et les combinaisons de charges à considérer dans les états limites ultimes et de service.
- Enfin, le troisième paragraphe présentera un tableau récapitulatif des charges affectées à chaque élément porteur (dalles, poutres, voiles, poteaux...), permettant ainsi de

synthétiser les efforts à prendre en compte dans les étapes ultérieures du dimensionnement.

L'ensemble de cette démarche vise à poser une base solide pour le calcul des efforts internes, la descente de charges, et le dimensionnement rationnel des semelles en béton armé.

3.2.1. Classification des charges

Dans toute étude de dimensionnement, la détermination des charges appliquées à la structure constitue une étape incontournable. Ces charges, appelées aussi actions mécaniques, représentent les efforts auxquels les fondations seront soumises et qu'elles devront transmettre au sol sans provoquer de déformation excessive ou de rupture.

Les charges sont classées en plusieurs catégories selon leur origine, leur fréquence d'apparition et leur effet sur la structure. Pour le bâtiment R+5 étudié ici, nous retiendrons les classifications suivantes, conformément aux normes Eurocode 1, BAEL91 et RPA99 :

a) Charges permanentes (G)

Les charges permanentes, encore appelées charges mortes, sont des charges constantes dans le temps. Elles ne varient pas pendant la durée de vie du bâtiment. Il s'agit principalement :

- du poids propre des éléments structurels : dalles, poutres, poteaux, murs, voiles ;
- des revêtements de sol et des cloisons fixes ;
- des plafonds suspendus, installations fixes, équipements sanitaires, etc.

b) Charges d'exploitation (Q)

Les charges d'exploitation, aussi appelées charges variables, dépendent de la destination du bâtiment.

Dans notre cas :

- pour le rez-de-chaussée à usage commercial, on applique une charge normative de $5,0 \text{ kN/m}^2$;
- pour les étages résidentiels, la charge d'exploitation est de $2,0$ à $3,0 \text{ kN/m}^2$ selon les zones (chambres, séjours, escaliers).

c) Charges climatiques (W, S)

Même si Lubumbashi n'est pas classée en zone à risque élevé, les effets suivants doivent être considérés :

- Vent (W) : pression dynamique modérée, à considérer surtout sur les façades et les toitures ;
- Séisme (S) : conformément au RPA99/V2003, bien que la zone soit faiblement sismique, on intègre un coefficient sismique minimal ($a = 0,05g$) pour les effets dynamiques horizontaux.

d) Charges exceptionnelles

Il s'agit de charges accidentelles dues à des situations non fréquentes : surcharge temporaire, choc, intervention, etc. Elles sont en général négligées dans le dimensionnement courant, sauf pour les bâtiments industriels ou hospitaliers.

3.2.2. Hypothèses de calcul

Les hypothèses de calcul utilisées dans le dimensionnement des éléments porteurs et des fondations d'un bâtiment doivent être conformes aux règlements techniques reconnus afin d'assurer la sécurité, la durabilité et la stabilité de l'ouvrage. Dans le cas présent, nous avons retenu les références suivantes:

- a) Règlements et normes appliquées
 - Eurocode 1 (EN 1991) : pour la détermination des actions gravitaires, climatiques et exceptionnelles.
 - Eurocode 2 (EN 1992) : pour le calcul des structures en béton armé.
 - BAEL91 modifié 99 : pour le dimensionnement selon les états limites (adopté localement dans plusieurs projets en RDC).
 - RPA99 modifié 2003 : pour la prise en compte des effets sismiques, même faibles.

Ces règlements introduisent des coefficients de sécurité et des formules de combinaison de charges afin d'évaluer les sollicitations maximales auxquelles la structure peut être confrontée.

b) Coefficients partiels de sécurité

Tableau 1 : Coefficients partiels de sécurité

Type de charge	Symbole	Coefficient (γ)
Charges permanentes	G	1,35
Charges d'exploitation	Q	1,50
Charges climatiques	W ou S	1,50

Ces coefficients permettent de passer de la valeur caractéristique des charges à leur valeur de calcul, selon la formule :

$$\text{Charge majorée} = \gamma_G \times G + \gamma_Q \times Q + \gamma_S \times S$$

c) Cas de combinaison des charges (ULS)

Selon l'Eurocode 1 (cas fondation – combinaison fondamentale), on utilise la combinaison suivante :

$$E_d = \gamma_G \times G_k + \gamma_Q \times Q_k$$

Où :

- E_d est l'effet de la combinaison à l'état limite ultime,
- G_k est la valeur caractéristique des charges permanentes,
- Q_k est la valeur caractéristique des charges variables.

d) Exemple chiffré de combinaison appliquée à une dalle d'habitation

- Poids propre de la dalle : $G = 3.5 \text{ kN/m}^2$
- Charge d'exploitation : $Q = 2.0 \text{ kN/m}^2$

Calcul de la charge majorée :

$$E_d = 1,35 \times 3,5 + 1,5 \times 2,0 = 4,725 + 3,0 = 7,725 \text{ kN/m}^2$$

On retiendra donc une charge totale de $7,725 \text{ kN/m}^2$ pour cette dalle dans les calculs de descente de charges vers les poutres et fondations.

3.2.3. Tableau récapitulatif des charges affectées à chaque élément porteur

Après avoir identifié les différentes catégories de charges appliquées au bâtiment (charges permanentes, d'exploitation, climatiques), il convient maintenant de les répartir de manière spécifique sur les éléments porteurs. Cette étape est essentielle pour préparer la

descente de charges et permettre un dimensionnement réaliste des poutres, poteaux et semelles.

Le tableau ci-dessous regroupe les principales valeurs caractéristiques des charges retenues pour les éléments structuraux du bâtiment R+5 à usage mixte. Ces valeurs proviennent soit des règlements techniques (Eurocodes, BAEL91), soit d'estimations issues de la pratique courante dans les projets similaires.

Tableau 2 : Répartition des charges sur les éléments porteurs

Élément porteur	Charge permanente (G) kN/m ²	Charge d'exploitation (Q) kN/m ²	Observations techniques
Dalle (étages résidentiels)	3,5	2,0	Dalle pleine béton armé de 14 cm d'épaisseur
Dalle (RDC commercial)	4,0	5,0	Dalle renforcée avec revêtements résistants
Poutres principales	5,0	—	Reprennent les dalles, murs et charges linéaires cumulées
Poutres secondaires	3,0	—	Reprennent la dalle sur petites portées
Voiles porteurs	6,0	—	Murs verticaux en béton armé de 20 cm d'épaisseur
Escaliers	4,5	3,0	Marches, contremarches, limons inclus dans la charge totale
Toiture terrasse	2,0	1,5	Prise en compte d'un usage léger et des dispositifs d'étanchéité
Cloisons intérieures	1,0	—	Cloisons en brique légère ou en carreaux creux

Ces valeurs seront utilisées dans la modélisation structurelle, puis dans la descente de charges afin de déterminer les sollicitations transmises aux semelles. La combinaison de ces efforts avec les coefficients de sécurité permettra d'assurer la stabilité globale du bâtiment dans toutes les configurations d'exploitation normales.

3.3.1. Choix du logiciel de modélisation

Le choix du logiciel de modélisation constitue une étape décisive dans tout projet de dimensionnement structurel, surtout lorsqu'il s'agit d'un bâtiment à plusieurs niveaux comme celui de type R+5. Ce type de structure présente une complexité géométrique, des sollicitations multiples et une interaction sol-structure non négligeable qui nécessitent un outil de calcul fiable, précis et conforme aux normes internationales.

Dans le cadre de ce travail, nous avons opté pour l'utilisation du logiciel ETABS (*Extended Three-Dimensional Analysis of Building Systems*), développé par CSI (Computers and Structures, Inc.), largement reconnu dans le domaine de l'ingénierie structurelle. Ce choix se justifie par plusieurs raisons techniques et pratiques :

- Spécialisation dans les structures de bâtiments : Contrairement à d'autres logiciels généralistes, ETABS est conçu spécifiquement pour l'analyse et la conception des bâtiments, notamment les structures en béton armé et en acier. Il intègre des fonctionnalités optimisées pour les charges verticales, latérales (vent, séisme), les descentes de charges automatiques, et la vérification des normes locales et internationales.
- Prise en charge des normes internationales : ETABS permet d'appliquer directement les règlements tels que l'Eurocode, l'ACI, l'UBC, ou encore le RPA99 utilisé pour la réglementation parasismique en Afrique du Nord et partiellement en RDC. Ce point garantit la conformité de la modélisation aux exigences de sécurité.
- Modélisation 3D intuitive : Grâce à son interface graphique avancée, le logiciel permet une modélisation tridimensionnelle détaillée de la structure, avec la possibilité de visualiser les éléments (poutres, poteaux, dalles, voiles) et de simuler leur comportement sous charges.
- Analyse statique et dynamique intégrée : ETABS est capable de réaliser des analyses selon différentes approches (linéaire, modale, spectrale), ce qui est essentiel pour un bâtiment de 5 niveaux soumis à des effets sismiques, même modérés.

- Interopérabilité et précision des résultats : Il permet également l'exportation des résultats vers d'autres logiciels comme SAP2000 ou SAFE pour le calcul des fondations, ce qui constitue un avantage pour le travail de dimensionnement global. Les résultats fournis sont précis et exploitables sous forme de tableaux, diagrammes, et animations.

Le recours à ETABS dans ce mémoire vise à assurer une modélisation réaliste, une lecture correcte des efforts internes et une justesse dans le dimensionnement des éléments porteurs, avec un niveau de fiabilité conforme aux standards de l'ingénierie moderne. Le choix de cet outil permet aussi d'intégrer aisément les hypothèses de charge, les paramètres du sol et les conditions aux limites spécifiques au projet.

3.3.2. Schéma de la modélisation

Dans le cadre du dimensionnement du bâtiment R+5 à usage mixte, une modélisation tridimensionnelle complète de la structure a été réalisée à l'aide du logiciel ETABS, conformément aux hypothèses de charges définies dans les sections précédentes. Cette étape vise à représenter numériquement tous les éléments porteurs du bâtiment et à analyser leurs comportements sous l'effet des sollicitations combinées.

a) Structure modélisée

Le modèle comprend :

- Cinq niveaux (R+5) plus un rez-de-chaussée commercial ;
- Une trame de poteaux réguliers de section carrée (30x30 cm à 40x40 cm selon les étages) ;
- Des poutres principales et poutres secondaires dimensionnées selon la portée et les charges de dalle ;
- Des dalles pleines en béton armé d'épaisseur moyenne de 14 cm ;
- Des voiles porteurs sur les noyaux de circulation verticale (escaliers, cages d'ascenseur) ;
- Des semelles isolées pour chaque poteau en interaction avec un sol de portance admissible variable (0,20 à 0,25 MPa).

b) Représentation schématique

Le schéma de la modélisation comprend :

- L'élévation latérale de la structure : vue en coupe de l'enchaînement des étages, des appuis et des descentes de charges ;
- La trame horizontale (plan d'étage) indiquant la répartition des poutres et poteaux ;
- Les conditions aux limites : appuis encastres à la base des poteaux et semelles ;
- La numérotation automatique des nœuds et éléments pour l'analyse des efforts internes.


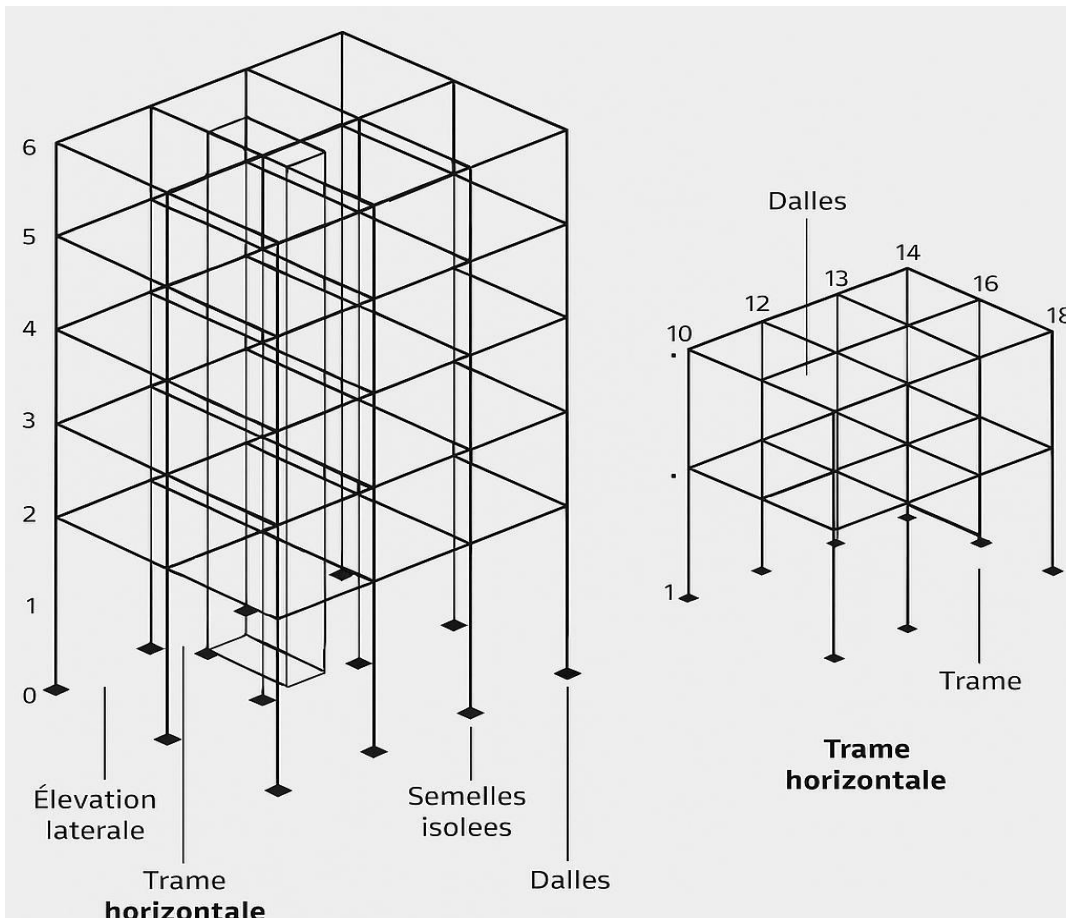
 Remarque : Le modèle est conçu en treillis tridimensionnel, chaque élément étant représenté comme une ligne de liaison rigide ou semi-rigide, auquel sont affectées les propriétés mécaniques du béton (classe C25/30) et les armatures.

Schéma technique



3.3.3. Hypothèses de calcul

Dans le cadre du dimensionnement des éléments porteurs de la structure du bâtiment R+5 à usage d'habitation et commercial, plusieurs hypothèses de calcul ont été adoptées. Ces hypothèses tiennent compte des matériaux utilisés, des conditions de charges, des réglementations en vigueur et des contraintes spécifiques du site. Elles permettent d'assurer la cohérence des résultats issus de la modélisation et de garantir la stabilité et la sécurité de l'ouvrage.

a) Hypothèses générales

- Type de béton : C25/30 (résistance caractéristique à la compression $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$)
- Acier utilisé : FeE 500 ($f_y = 500 \text{ MPa}$ pour les armatures longitudinales et transversales)

- Portée moyenne des poutres : entre 3,5 et 5 m selon la trame
 - Épaisseur moyenne des dalles : 14 cm pour les niveaux résidentiels, 16 cm pour le RDC commercial
 - Épaisseurs permanentes (G) : Poids propre des éléments + cloisons + revêtements
 - Charges d'exploitation (Q) : selon les usages (habitation, commerce)
 - Coefficient de fluage (ϕ) : pris à 2,2 pour un béton de 28 jours
 - Module d'élasticité du béton (E_{cm}) : 31 GPa (selon Eurocode 2)
- b) Hypothèses spécifiques par élément

Élément	Hypothèse de calcul principale	Justification technique
Dalles	Comportement en flexion bidirectionnelle (plancher-dalle pleine)	Trame orthogonale régulière
Poutres	Poutres continues – calcul en flexion simple ou flexion composée	Portée entre 3,5 m et 5 m, appuis multiples
Poteaux	Sollicitations axiales + excentrement modéré (N + M)	Poteaux encastres à la base, charges verticales
Voiles	Élément de contreventement – chargement latéral + vertical	Action sismique modérée + stabilité verticale
Semelles	Appui souple, charge répartie centrée ou excentrée	Interaction sol-structure, sol de portance moyenne

c) États limites considérés

Les éléments ont été dimensionnés en tenant compte des deux états limites suivants :

- État Limite Ultime (ELU) : vérification de la résistance des sections (rupture)
- État Limite de Service (ELS) : vérification des flèches, fissuration et vibrations

3.4. Calcul des efforts internes

La présente section est consacrée à l'analyse des sollicitations internes qui naissent au sein des éléments porteurs de la structure modélisée, suite à l'application des différentes charges combinées (charges permanentes, d'exploitation, climatiques et exceptionnelles). Ces efforts internes sont indispensables à la compréhension du comportement mécanique global de la structure et conditionnent les dimensions, les sections et le ferrailage des poutres, poteaux, dalles et semelles.

Les résultats analysés dans cette section proviennent directement de la modélisation effectuée dans le logiciel ETABS, en tenant compte des hypothèses préalablement établies. Les efforts internes considérés sont principalement : le moment fléchissant (M), l'effort tranchant (V) et l'effort normal (N). Leur répartition, leur intensité et leur position dans la structure déterminent les zones critiques à renforcer, ainsi que les sections minimales requises.

Pour assurer une présentation claire et cohérente de ces efforts, cette section sera divisée en trois paragraphes essentiels :

- Le premier paragraphe sera consacré au calcul des moments fléchissants, qui représentent les sollicitations de flexion dans les éléments horizontaux. On y analysera les moments maximaux en travées et aux appuis, sur les poutres principales et secondaires, avec représentation schématique des diagrammes de moment.
- Le deuxième paragraphe traitera du calcul des efforts tranchants, responsables des sollicitations de cisaillement dans les poutres et au niveau des appuis. L'analyse portera sur l'identification des zones critiques et sur l'ampleur des forces de cisaillement à considérer pour le dimensionnement des armatures transversales (étriers).
- Le troisième paragraphe abordera le calcul des efforts normaux, principalement les forces axiales de compression subies par les poteaux et les semelles. Ces efforts verticaux issus de la descente de charges seront utilisés pour le dimensionnement des éléments verticaux et la vérification des contraintes de sol admissibles.

Cette démarche analytique permettra de disposer d'une base fiable pour le dimensionnement rationnel de la structure porteuse, garantissant sécurité, stabilité et conformité aux normes en vigueur.

3.4.1. Calcul des moments fléchissants

Le moment fléchissant (ou moment de flexion) est l'une des sollicitations fondamentales à prendre en compte dans le dimensionnement des éléments horizontaux d'un bâtiment, notamment les poutres, les dalles et dans certains cas les voiles porteurs. Il traduit la tendance d'un élément à se courber sous l'effet d'une charge perpendiculaire à son axe longitudinal.

Dans le cas du présent bâtiment R+5, les moments fléchissants ont été obtenus à partir de la modélisation structurelle réalisée sous ETABS. Les combinaisons de charges appliquées incluent : le poids propre de la structure, les charges permanentes (revêtements, cloisons), les charges d'exploitation, les actions climatiques (vent, pluie) et les actions sismiques modérées selon le RPA99 (zone 2).

a) Zones critiques de flexion

L'analyse des diagrammes de moment issus du modèle montre que :

- Les poutres principales subissent des moments maximaux au niveau des appuis intermédiaires (moments négatifs) et en travée (moments positifs), avec des valeurs qui varient entre 35 et 65 kN.m selon la portée et la charge cumulée.
- Les poutres secondaires, plus courtes et moins chargées, présentent des moments fléchissants de l'ordre de 15 à 30 kN.m.
- Les dalles pleines ont été modélisées comme des coques en flexion bidirectionnelle, avec des moments fléchissants répartis selon les axes X et Y. La valeur maximale relevée est d'environ 12 kN.m/m au centre des travées.

b) Exemple de calcul d'un moment fléchissant (poutre continue sur deux travées égales)

Soit une poutre de 5 m de portée, soumise à une charge uniformément répartie $q = 15$ kN/m (charge majorée).

On utilise la formule classique du moment fléchissant maximum pour une poutre continue sur deux travées :

- Moment en travée :

$$M_{\max, tr} = (q \times L^2)/8 = (15 \times 5^2)/8 = 375/8 = 46,875 \text{ kN.m}$$

- Moment sur appui :

$$M_{\max, \text{appui}} = -(q \times L^2)/12 = -(15 \times 25)/12 = -31,25 \text{ kN.m}$$

Ces résultats seront ensuite utilisés pour le dimensionnement en flexion des sections de poutres, à l'aide des formules de résistance des matériaux (section rectangulaire en béton armé) :

$$M_{rd} = (1/\gamma_c) \times f_{cd} \times z \times A_s$$

avec :

- $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$: résistance de calcul du béton,
 - z : bras de levier,
 - A_s : section d'acier tendu nécessaire.
- c) Interprétation des diagrammes de moment (issus du logiciel)

Le logiciel fournit des diagrammes de moment le long de chaque poutre, permettant de visualiser précisément :

- les zones de traction/compression ;
- les inversions de signe du moment ;
- les points de moment nul.

Ces informations sont capitales pour le positionnement des armatures longitudinales (barres tendues en travée et comprimées aux appuis).

3.4.2. Calcul des efforts tranchants

L'effort tranchant (ou effort de cisaillement) est une force interne qui tend à faire glisser les différentes couches d'un élément de structure l'une par rapport à l'autre. Il agit généralement perpendiculairement à l'axe longitudinal des poutres ou dalles, et sa prise en compte est indispensable pour prévenir la rupture fragile par cisaillement, notamment aux extrémités des travées.

Dans une structure comme celle du bâtiment R+5 étudié ici, les efforts tranchants sont particulièrement importants dans les poutres principales, au voisinage des appuis, où les variations de charges et de moments sont les plus marquées.

a) Localisation des efforts maximaux

À partir des résultats fournis par le logiciel ETABS, on constate que :

- Les poutres principales présentent des pics de cisaillement aux appuis intermédiaires, avec des valeurs pouvant atteindre jusqu'à 75 à 90 kN selon les charges combinées.
- Les poutres secondaires, soumises à des portées plus réduites, présentent des efforts tranchants plus modérés, de l'ordre de 25 à 45 kN.
- Les voiles porteurs, sollicités verticalement, peuvent aussi subir des cisaillements horizontaux dus aux effets du vent ou à la dissymétrie des charges.

b) Exemple de calcul de l'effort tranchant maximal

Prenons l'exemple d'une poutre simplement appuyée de 5 m de portée, soumise à une charge uniformément répartie de $q = 15 \text{ kN/m}$:

$$V_{\max} = (q \times L) / 2 = (15 \times 5) / 2 = 37,5 \text{ kN}$$

Cette valeur représente l'effort tranchant maximal à l'appui. Elle permet de vérifier la capacité de la section de poutre à résister au cisaillement sans fissuration excessive ni rupture.

c) Dimensionnement des armatures transversales

Les efforts tranchants sont repris par des armatures en étriers (ou cadres) disposées perpendiculairement ou inclinées par rapport à l'axe de la poutre. La vérification repose sur la formule de résistance au cisaillement :

$$V_{Rd} = V_c + V_s$$

avec :

- V_c : contribution du béton (généralement faible dans les zones fortement sollicitées),
- V_s : contribution des étriers (calculée à partir de la section, de l'espacement et de la limite élastique de l'acier).

Les hypothèses adoptées pour le calcul sont conformes aux prescriptions de l'Eurocode 2 et du BAEL91. Pour les zones de forte sollicitation (voisinage des appuis), un espacement minimum de 10 cm est recommandé pour les étriers en acier FeE500.

3.4.3. Calculs des efforts normaux

Les efforts normaux représentent les forces agissant selon l'axe longitudinal des éléments verticaux de la structure, en particulier les poteaux, voiles porteurs et semelles. Ces efforts sont généralement axiaux et correspondent aux charges de compression transmises par les éléments supérieurs du bâtiment vers le sol.

Dans le contexte d'un bâtiment R+5, les efforts normaux sont particulièrement importants dans la descente de charges verticales, car ils influencent directement : la section minimale des poteaux, la résistance à la compression du béton et le dimensionnement des fondations (notamment les semelles isolées).

a) Origine des efforts normaux

Les efforts normaux résultent principalement de :

- Charges permanentes (G) : poids propre de la dalle, des murs, des poutres et du plancher ;
- Charges d'exploitation (Q) : charges variables dues à l'occupation (mobilier, personnes, marchandises) ;
- Effets secondaires : vent vertical, surcharge exceptionnelle ou effets sismiques verticaux.

Ces efforts ont été déterminés automatiquement par le logiciel ETABS, en fonction de la modélisation complète du bâtiment.

b) Exemple de calcul d'un effort normal

Prenons un poteau central situé au rez-de-chaussée supportant cinq niveaux. En considérant une charge verticale totale de 1250 kN provenant des étages supérieurs, l'effort normal dans le poteau peut être exprimé par la formule :

$$N = \sum (A_i \times q_i)$$

où :

- A_i est la surface d'influence de l'étage i ;
- q_i est la charge répartie verticale affectée à cette surface (en kN/m²).

Exemple :

- Surface d'influence = 25 m² ;
- Charge totale moyenne par niveau (structure + exploitation) = 10 kN/m² ;

- Nombre de niveaux = 5 ;

$$N = 5 \times 25 \times 10 = 1250 \text{ kN}$$

Cette force est transmise verticalement dans l'axe du poteau jusqu'à la fondation, qui devra être dimensionnée pour supporter cette charge en compression sans dépassement de la contrainte admissible du sol.

c) Utilisation des efforts normaux dans le dimensionnement

Les efforts normaux calculés sont utilisés :

- pour vérifier la capacité portante des poteaux à la compression ;
- pour déterminer les dimensions et le taux d'armature des éléments verticaux ;
- pour le dimensionnement des semelles isolées, selon la formule classique de l'équilibre :

$$\sigma = N / A_f \leq \sigma_{\text{sol}}$$

où :

- σ est la contrainte de contact sol-fondation,
- N est l'effort normal appliqué,
- A_f est la surface de la semelle,
- σ_{sol} est la contrainte admissible du sol (généralement entre 0,20 et 0,25 MPa dans la zone ALLI-LAC).

3.5. Dimensionnement des éléments porteurs

Le dimensionnement des éléments porteurs constitue l'étape essentielle de la conception structurelle d'un bâtiment. Il s'agit de définir avec précision les sections, les armatures et les dispositions constructives nécessaires pour que chaque élément résiste aux sollicitations qui lui sont appliquées, tout en respectant les critères de sécurité, de stabilité et de durabilité imposés par les règlements en vigueur.

Dans le cadre de cette étude portant sur un bâtiment R+5 à usage mixte, l'accent sera mis sur les poutres, poteaux, semelles et éléments en béton armé essentiels au transfert des charges verticales et horizontales. Les calculs seront effectués conformément aux prescriptions du Règlement Parasismique Algérien (RPA99), du BAEL91 (Béton Armé aux États Limites), et des principes généraux de l'Eurocode 2, en tenant compte des efforts internes (M, V, N) préalablement déterminés.

Cette section sera subdivisée en quatre paragraphes analytiques :

- Le premier paragraphe portera sur le dimensionnement des armatures longitudinales, à partir des efforts de flexion et de compression. Il s'agira de déterminer la section d'acier nécessaire à chaque élément, en utilisant les formules de dimensionnement en béton armé.
- Le deuxième paragraphe analysera les pourcentages minimaux d'armature exigés par les normes, en tenant compte de la classe du béton, de la ductilité et du type d'élément (poutre, poteau, semelle). Cette vérification permet de prévenir la fissuration prématurée et les défauts de résistance.
- Le troisième paragraphe traitera de la vérification des contraintes admissibles, aussi bien dans les matériaux (béton et acier) que dans le sol supportant les fondations. On vérifiera notamment que les contraintes calculées ne dépassent pas les seuils autorisés par les règlements.
- Le quatrième paragraphe présentera les tableaux de dimensionnement, qui synthétisent les résultats obtenus pour chaque type d'élément porteur : dimensions géométriques, sections d'armatures, espacement, enrobage et contraintes maximales observées.

Cette organisation méthodique permettra de traduire les efforts mécaniques en solutions constructives concrètes, garantissant la résistance, la stabilité et la durabilité de la structure porteuse du bâtiment étudié.

3.5.1. Armature longitudinale : méthode de calcul

Les armatures longitudinales jouent un rôle essentiel dans le comportement des éléments en béton armé, notamment les poutres, poteaux et voiles porteurs. Elles assurent la résistance à la traction, à la compression, ainsi qu'à la flexion générée par les moments et les charges appliquées. Leur dimensionnement correct garantit non seulement la sécurité de l'ouvrage, mais aussi sa durabilité face aux sollicitations répétées.

a) Principes de dimensionnement

Le calcul des armatures longitudinales se base sur les états limites ultimes (ELU), où l'élément est supposé sollicité jusqu'à sa capacité maximale. La section minimale d'acier à prévoir doit permettre à la structure de résister aux efforts fléchissants ou axiaux dans le cas des poteaux.

Pour une section rectangulaire soumise à la flexion simple, la formule générale de calcul de l'armature tendue est :

$$A_s = M_{ed} / (z \times f_{yd})$$

avec :

- A_s : section d'acier nécessaire (mm²),
- M_{ed} : moment fléchissant de calcul (kN.m),
- z : bras de levier (généralement $\approx 0,9d$, avec d = hauteur utile),
- f_{yd} : résistance de calcul de l'acier (f_{yk}/γ_s), soit $500/1,15 \approx 435$ MPa pour l'acier FeE500.

b) Exemple d'application : poutre principale

Considérons une poutre principale sollicitée par un moment fléchissant $M_{ed} = 60$ kN.m, une hauteur utile $d = 500$ mm, et un bras de levier estimé à $z = 450$ mm. La section d'acier nécessaire est alors :

$$A_s = (60 \times 10^6) / (450 \times 435) \approx 306 \text{ mm}^2$$

On choisit deux barres de $\varnothing 14$ mm ($2 \times 154 \text{ mm}^2 = 308 \text{ mm}^2$) pour satisfaire cette exigence, placées dans la zone tendue.

c) Cas des poteaux : compression centrée ou excentrée

Pour les poteaux, sollicités principalement en compression axiale, le calcul de l'armature longitudinale obéit à une autre logique. La formule courante utilisée est :

$$A_s \geq p_{\min} \times A_{\square}$$

où :

- p_{\min} est le taux minimal d'armature (généralement 0,01 à 0,02 selon la norme),
- A_{\square} est la section brute du béton (mm^2).

Exemple : un poteau de 30×30 cm $\rightarrow A_{\square} = 90000 \text{ mm}^2$, donc $A_s \geq 0,015 \times 90000 = 1350 \text{ mm}^2$. Cela peut être obtenu par 4 barres $\varnothing 20$ mm ($4 \times 314 \text{ mm}^2 = 1256 \text{ mm}^2$) + 2 barres $\varnothing 14$ mm.

d) Considérations pratiques

Les normes exigent un enrobage minimal (2 à 4 cm) pour protéger l'acier contre la corrosion, surtout en milieu humide. Il faut aussi respecter un espacement minimal entre barres et assurer une disposition symétrique des armatures pour l'équilibre structurel.

3.5.2. Pourcentages minimaux d'armature

Le respect des pourcentages minimaux d'armature est une exigence fondamentale dans le dimensionnement des éléments en béton armé. Ces valeurs, imposées par les normes de construction telles que le BAEL91, le RPA99 ou encore l'Eurocode 2, garantissent la

sécurité structurelle en assurant une ductilité suffisante, une résistance minimale en cas de fissuration, et une prévention des ruptures fragiles.

Le pourcentage minimal d'armature dépend du type d'élément (poutre, poteau, dalle, semelle), de la nature des sollicitations (traction, flexion, compression) et des caractéristiques du béton et de l'acier utilisés.

a) Poutres

Pour les poutres en béton armé, les normes imposent une armature longitudinale minimale pour assurer le maintien de la résistance même en cas de fissuration :

$$\rho_{\min} = A_s / (b \times d) \geq (0,26 \times f_{ctm}) / f_{yk}$$

avec :

- A_s : section d'acier (mm^2),
- b : largeur de la section (mm),
- d : hauteur utile (mm),
- f_{ctm} : résistance moyenne à la traction du béton ($\approx 2,9$ MPa pour C25/30),
- f_{yk} : limite élastique de l'acier (500 MPa).

Exemple :

$$\rho_{\min} \approx (0,26 \times 2,9) / 500 = 0,0015$$

$$\text{Pour une poutre de } 300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \rightarrow A_{s,\min} = 0,0015 \times 300 \times 500 = 225 \text{ mm}^2$$

\rightarrow 2 barres de $\varnothing 12$ mm ($2 \times 113 \text{ mm}^2 = 226 \text{ mm}^2$) suffisent.

b) Poteaux

Pour les poteaux, sollicités en compression ou compression excentrée, les normes exigent un taux d'armature compris entre 1% et 4% de la section brute du béton :

$$0,01 \times A_c \leq A_s \leq 0,04 \times A_c$$

$$\text{Exemple : poteau de } 30 \times 30 \text{ cm} \rightarrow A_c = 90000 \text{ mm}^2$$

$$\text{- } A_{s,\min} = 0,01 \times 90000 = 900 \text{ mm}^2$$

$$\text{- } A_{s,\max} = 0,04 \times 90000 = 3600 \text{ mm}^2$$

c) Semelles isolées

Pour les semelles, le pourcentage minimal dépend du type de sollicitation. En flexion, le minimum imposé est généralement 0,15% de la section tendue :

$$\rho_{\min, \text{semelle}} = 0,0015$$

Exemple : semelle de 1,5 m × 1,5 m, hauteur utile = 0,45 m →

$$A_s = 0,0015 \times 1500 \times 450 = 1012,5 \text{ mm}^2$$

→ 4 barres de Ø16 mm ($4 \times 201 \text{ mm}^2 = 804 \text{ mm}^2$) ou 5 barres de Ø14 mm ($5 \times 154 \text{ mm}^2 = 770 \text{ mm}^2$)

d) Conséquences du non-respect

Le non-respect des pourcentages minimaux peut entraîner :

- Fissuration prématurée du béton ;
- Instabilité locale (flambement) ;
- Insuffisance de ductilité, menant à des ruptures brutales ;
- Non-respect des normes parasismiques, critique dans une zone comme Lubumbashi.

3.5.3. Vérification des contraintes admissibles

La vérification des contraintes admissibles constitue une étape fondamentale dans le dimensionnement des éléments porteurs. Elle permet de s'assurer que les sollicitations générées par les charges appliquées ne dépassent pas les capacités maximales des matériaux utilisés (béton, acier) et du sol support.

Le respect des contraintes admissibles garantit la sécurité structurale, évite les ruptures fragiles, et assure la durabilité de l'ouvrage dans le temps.

a) Contraintes dans le béton

La norme BAEL91 stipule que la contrainte de compression dans le béton, notée σ_c , doit rester inférieure à la contrainte admissible, qui dépend de la classe du béton utilisée.

Pour un béton de classe C25/30, la contrainte admissible de calcul est :

$$\sigma_{c, \text{adm}} = f_{ck} / \gamma_c = 25 \text{ MPa} / 1,5 \approx 16,7 \text{ MPa}$$

Exemple :

Section de béton $A_c = 90000 \text{ mm}^2$, Effort normal $N = 1350 \text{ kN}$

$$\rightarrow \sigma_c = 1350 \times 10^3 / 90000 = 15 \text{ MPa} < 16,7 \text{ MPa} \rightarrow \text{OK}$$

b) Contraintes dans l'acier

La contrainte admissible dans l'acier, σ_s , est vérifiée à l'état limite ultime (ELU) :

$$\sigma_s \leq f_{yk} / \gamma_s$$

Pour l'acier FeE500 :

$$\sigma_{s,adm} = 500 / 1,15 \approx 435 \text{ MPa}$$

Exemple : Si l'acier est sollicité à 410 MPa $\rightarrow 410 \text{ MPa} < 435 \text{ MPa} \rightarrow \text{OK}$

c) Contraintes admissibles dans le sol

La contrainte admissible du sol, σ_{sol} , représente la pression maximale que le sol peut supporter sans entraîner de tassement excessif ni rupture. Elle est obtenue par étude géotechnique.

Dans le site d'ALLI-LAC (Lubumbashi) :

$$\sigma_{sol,adm} \approx 0,20 \text{ MPa (ou } 200 \text{ kN/m}^2\text{)}$$

Exemple : Semelle de 2 m^2 recevant une charge de 350 kN

$$\rightarrow \sigma_{sol} = 350 / 2 = 175 \text{ kN/m}^2 < 200 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \text{OK}$$

d) Conclusion de la vérification

Les vérifications montrent que :

- Les contraintes dans le béton et l'acier sont inférieures aux limites admissibles ;
- La pression transmise au sol est supportable.

Le dimensionnement proposé est donc conforme aux exigences de sécurité et de stabilité.

3.5.4. Tableaux de dimensionnement des poutres, poteaux, semelles

Après les étapes de modélisation, de calcul des efforts internes et de vérification des contraintes admissibles, il est essentiel de synthétiser les résultats dans des tableaux de dimensionnement. Ces tableaux facilitent la lecture des sections finales adoptées, les caractéristiques des armatures choisies et les vérifications de conformité par rapport aux normes en vigueur.

Ils représentent une traduction chiffrée des efforts analysés et permettent aux ingénieurs, aux chefs de chantier ou aux vérificateurs techniques de disposer de repères clairs pour l'exécution sur site.

a) Tableau de dimensionnement des poutres

Élément	Section (mm)	Moment M _{Ed} (kN·m)	As requise (mm ²)	Armature proposée	Remarque
P1	300 × 500	70	415	2HA16 + 2HA14	OK
P2	250 × 450	55	325	2HA14	OK
P3	200 × 400	40	240	2HA12	OK

b) Tableau de dimensionnement des poteaux

Élément	Section (mm)	Effort N (kN)	As min (mm ²)	Armature proposée	Remarque
C1	300 × 300	1350	1350	4HA20 + 2HA14	OK
C2	250 × 250	1100	938	4HA16	OK
C3	200 × 200	800	720	4HA14	OK

c) Tableau de dimensionnement des semelles

Élément	Dimensions (m)	Charge (kN)	σ_{sol} (kN/m ²)	As (mm ²)	Armature proposée
S1	1.5 × 1.5	350	175	1013	4HA16
S2	2.0 × 2.0	600	150	1350	5HA16
S3	1.2 × 1.2	300	208	950	3HA14

3.6 Vérifications structurelles

Sous cette section, il sera question, d'une part, de vérifier le comportement des éléments porteurs face aux déformations, instabilités et sollicitations concentrées (section 1 à 4), et, d'autre part, de présenter des schémas explicatifs pour illustrer les cas vérifiés (section 5).

3.6.1. Vérification des déformations (flèche)

La flèche est une déformation verticale qui se manifeste sous l'effet des charges appliquées sur les éléments horizontaux porteurs tels que les poutres ou les dalles. Elle représente un paramètre critique dans le comportement des structures car, même si la résistance des matériaux est respectée, une flèche excessive peut provoquer des désordres fonctionnels, des fissures dans les cloisons non porteuses, une gêne esthétique, voire un inconfort perceptible par les occupants.

La vérification des flèches vise donc à s'assurer que les déformations restent dans les limites admissibles fixées par les normes de dimensionnement, notamment l'Eurocode 2, le BAEL91 et le RPA99. En général, la flèche limite d'une poutre est comprise entre $L/250$ et $L/500$, où L représente la portée de l'élément. Le choix de la limite dépend de l'usage du bâtiment, du type d'élément et des matériaux.

a) Flèche instantanée

Elle correspond à la déformation immédiate après application des charges permanentes et d'exploitation. Elle peut être estimée à partir de la formule :

$$f_{\text{inst}} = (5 \times w \times L^4) / (384 \times E \times I)$$

avec :

- f : flèche instantanée
- w : charge uniformément répartie (kN/m)
- L : portée de la poutre (m)
- E : module d'élasticité du béton (MPa)
- I : moment d'inertie de la section (mm⁴)

b) Flèche différée (fluage)

Sous l'effet des charges permanentes, le béton peut présenter des déformations différées appelées fluage. Celui-ci est pris en compte par un coefficient multiplicateur k (généralement entre 1,5 et 2 selon le temps de chargement). La flèche totale est alors :

$$f_{\text{totale}} = f_{\text{inst}} \times (1 + k)$$

c) Application au bâtiment R+5

Dans le cadre de notre bâtiment R+5 implanté au quartier ALLI-LAC, des poutres principales de 5 m de portée ont été dimensionnées. Avec une charge globale de 15 kN/m, une section de 300×500 mm et un béton de module $E = 30\,000$ MPa, on a estimé une flèche instantanée de :

$$f_{\text{inst}} = (5 \times 15 \times 5^4) / (384 \times 30\,000 \times 31,25 \times 10^6) \approx 12,3 \text{ mm}$$

En appliquant un coefficient de fluage de 1,8 :

$$f_{\text{totale}} \approx 12,3 \times (1 + 1,8) \approx 34,4 \text{ mm}$$

Or, la flèche admissible est :

$$f_{\text{adm}} = 5000 / 250 = 20 \text{ mm}$$

La flèche calculée dépasse la limite admissible, ce qui impose soit :

- une augmentation de la hauteur de la poutre,
- ou une augmentation de l'armature,
- ou une réduction de la portée.

d) Recommandation

Il est donc recommandé d'ajuster le ferrailage longitudinal ou la géométrie de la poutre pour ramener la flèche sous le seuil admissible. Ce contrôle est crucial dans les bâtiments à usage d'habitation et commercial comme celui du quartier ALLI-LAC, car la gêne due aux déformations est rapidement perceptible par les usagers.

3.6.2. Vérification du flambement des poteaux

Le flambement est un phénomène d'instabilité qui affecte les éléments comprimés élancés, comme les poteaux, lorsqu'ils sont soumis à une charge axiale critique. Il se manifeste par un déplacement latéral soudain et important de l'axe de la pièce, pouvant entraîner une défaillance structurelle même si le matériau n'atteint pas sa limite de rupture. Ce type de rupture est redoutable car il survient brutalement et sans signes précurseurs évidents.

Dans le contexte du bâtiment R+5 à usage mixte situé au quartier ALLI-LAC, les poteaux reprennent des charges importantes issues des étages supérieurs et doivent présenter une stabilité irréprochable. La vérification du flambement s'effectue donc à partir de l'analyse de leur élancement et de la charge critique admissible, selon les règles de calcul de l'Eurocode 2 et du BAEL91.

a) Élancement réduit et classe de flambement

L'élancement d'un poteau est un indicateur clé dans la vérification du flambement. Il se calcule par la formule :

$$\lambda = l_0 / i$$

avec :

- l_0 : longueur de flambement (fonction des conditions d'appui)
- i : rayon de giration de la section, $i = \sqrt{I/A}$

Lorsque l'élancement dépasse 90, le flambement devient probable, et une réduction de la capacité portante est nécessaire via des coefficients de réduction donnés dans les abaques normatifs.

b) Charge critique de flambement (Euler)

La charge critique est donnée par la formule d'Euler :

$$N_{cr} = (\pi^2 \times E \times I) / l_0^2$$

où :

- E : module d'élasticité du béton
- I : moment d'inertie
- l_0 : longueur de flambement

Dans la pratique, cette valeur est corrigée par un coefficient de sécurité partiel et un facteur de réduction lié à l'élancement.

c) Application au projet

Considérons un poteau rectangulaire de 30×30 cm, d'une hauteur libre de 3 m, soumis à un effort axial de 1 200 kN.

- $A = 90\,000 \text{ mm}^2$
- $I = (b \times h^3)/12 = (300 \times 300^3)/12 = 2,025 \times 10^8 \text{ mm}^4$
- $i = \sqrt{I/A} \approx 47,5 \text{ mm}$
- $\lambda = 3000 / 47,5 \approx 63$

Ce poteau est donc modérément élancé. La charge de flambement calculée donne un N_{cr} nettement supérieur à la charge appliquée, ce qui confirme sa stabilité. Un taux de compression réduit, inférieur à 0,6, indique une sécurité suffisante vis-à-vis du flambement.

d) Recommandation

Il est recommandé de vérifier systématiquement tous les poteaux du rez-de-chaussée et des étages inférieurs, car ce sont eux qui reprennent la majorité des charges verticales cumulées. Des dispositions comme le confinement des aciers, la réduction de la hauteur libre par des murs de remplissage, ou l'ajout d'appuis intermédiaires peuvent améliorer la résistance au flambement.