الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة -

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Optimisation du contreventement mixte en portiques-voiles des bâtiments en béton armé

Présentée par :

LASFER WIAM

Mémoire soutenu le 23 /06/2026 devant le jury composé de :

Président :	**Ayeb Belkheir**
Encadreur :	**H'MIDA HAMIDANE**
Examinateur :	**Goudjil Fayçal**

Promotion : 2025/2026

Remerciements

Je remercie tout d'abord **Allah**, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la santé, la force, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien mes études et réaliser ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur **H'MIDA HAMIDANE**, mon encadreur au sein de l'Université Cheikh Larbi Tébessi de Tébessa, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Civil. Je le remercie sincèrement pour ses conseils avisés, sa disponibilité, son accompagnement et l'attention qu'il a accordée à ce travail. Son encadrement a été d'une grande aide dans la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à remercier les membres du jury, Monsieur **Ayeb Belkheir** et Monsieur **Goudjil Fayçal**, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce mémoire. Je leur suis reconnaissante pour le temps consacré à son examen ainsi que pour leurs remarques et suggestions.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des enseignants et du personnel administratif du Département de Génie Civil de l'Université Cheikh Larbi Tébessi de Tébessa pour les connaissances acquises et l'accompagnement dont j'ai bénéficié tout au long de ma formation.

Je souhaite adresser une pensée particulière à ma chère mère, à mon grand-père que je considère comme mon père, ainsi qu'à mon frère. Leur soutien, leurs sacrifices, leurs encouragements et leur confiance ont été essentiels tout au long de mon parcours universitaire. Leur présence à mes côtés m'a permis d'avancer avec détermination et de surmonter les difficultés rencontrées. J'exprime également ma gratitude à toute ma famille pour son soutien moral et ses encouragements permanents.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire. J'adresse une pensée particulière à mes amis et collègues pour leur soutien, leurs encouragements et les moments de partage tout au long de cette période.

Lasfer Wiam

Dédicace

À ma tendre mère,

Mon héroïne, ma reine et **la prunelle de mes yeux**. À celle qui a bravé seule toutes les tempêtes, sacrifié sa jeunesse et tout donné pour nous élever, mon frère et moi, avec tête haute. Maman, ton amour inépuisable et tes prières ont été ma lumière dans les moments de doute. Ce diplôme est le tien ; il est le couronnement de tous tes sacrifices. Je t'aime infiniment.

À la mémoire de mon cher père,

Ravi aux siens trop tôt, mais dont l'héritage a tracé mon destin. Toi, l'architecte de métier, tu as semé en moi l'amour de la construction et de l'art de bâtir. Papa, ton absence demeure ma plus grande blessure, mais ton souvenir a toujours été mon guide. J'aurais tant aimé que tu sois là pour voir l'ingénieure en structure que je suis devenue aujourd'hui, marchant fièrement sur tes traces. Que ton âme repose en paix.

À mon cher grand-père (Papa),

L'ancre de ma vie et ma source d'inspiration. Merci d'avoir été ce repère infaillible, ce second père qui nous a entourés de sa sagesse et de sa protection. Que Dieu te préserve, mon cher Papa, et illumine tes jours comme tu as illuminé les nôtres.

À mon unique frère,

Mon pilier, mon complice et mon plus beau cadeau de la vie. Merci d'être ce protecteur discret et ce soutien indéfectible sur qui je peux toujours compter. Tu es ma fierté et mon éternel refuge.

À mes précieux grands-parents, à mes chers oncles, tantes, cousins et cousines,

À ma grande et belle famille, sans exception. Merci pour votre bienveillance, votre amour et votre présence chaleureuse qui ont fait de notre foyer un havre d'amour, de paix et de solidarité.

À mes fidèles amies,

À celles qui ont partagé mes rires, mes larmes, mes nuits blanches et mes réussites tout au long de ce parcours universitaire. Merci d'être mes sœurs de cœur.

Lasfer Wiam

Liste des Abréviations

Abréviation	Signification
BA	Béton Armé
BAEL	Béton Armé aux États-Limites (norme française de calcul des structures en BA)
CM	Centre de Masse
CR	Centre de Rigidité
CSI	Computers and Structures Inc.
ELA	État Limite Accidentel (combinaison sismique)
ELS	État Limite de Service
ELU	État Limite Ultime
ETABS	Extended Three-Dimensional Analysis of Building Systems (logiciel de calcul de structures)
EX	Charge sismique selon la direction X
EY	Charge sismique selon la direction Y
FeE400	Acier à haute adhérence de limite élastique 400 MPa
G	Charges permanentes (poids propre + charges mortes)
MPa	Mégapascal (unité de pression, 1 MPa = 1 N/mm²)
Q	Charges variables d'exploitation / Facteur de qualité (selon contexte)
R	Coefficient de comportement (ductilité) de la structure
RC	Reinforced Concrete (Béton Armé)
RDC	Rez-de-Chaussée
RM	Reinforced Masonry (Maçonnerie Armée)
RPA	Règlement Parasismique Algérien (version 99/2003)
T1	Période fondamentale de vibration (premier mode propre)
UBC	Uniform Building Code (norme américaine)

Liste des Figures

N° Figure	Titre
Figure I.01	Distribution de l'effort horizontal du diaphragme aux contreventements verticaux
Figure I.02	Effondrement total de la structure
Figure I.03	Contreventement longitudinal d'un bâtiment — Disposition des pans rigides
Figure I.04	Structure contreventée par portique
Figure I.05	Ossature en portiques (à plusieurs travées)
Figure I.06	Contreventements triangulés
Figure I.07	Diagonales en béton armé
Figure I.08	Pans de contreventement triangulés
Figure I.09	Bâtiment à voiles en béton armé
Figure I.10	Plastification d'un poteau d'angle due à la disposition asymétrique des voiles
Figure I.11	Structure « mixte » avec des murs porteurs couplés à des portiques
Figure I.12	Structure à noyau central
Figure I.13	Structure uniquement à murs porteurs
Figure I.14	Contreventement mixte d'un bâtiment
Figure I.15	Interaction entre les voiles de contreventement et les portiques (adapté de Taranath, 1988)
Figure I.16	Comportement des portiques rigides et des voiles de contreventement sous charges latérales : a) déformation en cisaillement ; b) déformation en flexion
Figure I.17	Répartition typique a) de l'effort tranchant et b) du moment fléchissant dans une structure mixte voile-portique (adapté de Nollet, 1991)
Figure I.18	Bâtiment hospitalier en BA à voiles de contreventement, intact lors du séisme de Kobe 1995 (Ghosh, 1995)
Figure I.19	Insuffisance de voiles au RDC ayant entraîné des dommages importants lors du séisme de Loma Prieta 1989
Figure I.20	Bâtiments en BA affectés par le séisme de Zemmouri : a) avec voiles ; b) sans voiles
Figure I.21	Dommages sévères aux poteaux du premier étage conduisant à l'effondrement (Doğangün et al., 2013)
Figure I.22	Configuration structurelle proposée des voiles ductiles (D) et gravitaires (G) pour bâtiments en maçonnerie armée (RM)

N° Figure	Titre
Figure I.23	Plans de niveaux présentant des zones de voiles de cisaillement de 1,5 % (gauche) et 2,0 % (droite)
Figure I.24	Rapports maximaux de dérive élastique inter-étages et limites de dérive (Soydaş, 2009)
Figure I.25	Géométrie du bâtiment à voiles-portiques avec un ratio de voiles de 1,0 % (Burak & Çömlekoğlu, 2013)
Figure I.26	Géométrie d'un étage type
Figure I.27	Modèle de bâtiment en forme de T (Model 02)
Figure I.28	a) Modèle mésoscopique d'un voile de cisaillement en BA (RC) ; b) rapports de portée de cisaillement λ et taux de ferraillage vertical ρ_v
Figure II.01	Icône du logiciel ETABS sur système d'exploitation Windows 10
Figure II.02	DISPOSITION 1 — Voiles périphériques continus en about
Figure II.03	DISPOSITION 2 — Voiles en about L=2
Figure II.04	DISPOSITION 3 — Voiles en forme L
Figure II.05	DISPOSITION 4 — Configuration 4 (excentricité non conforme)
Figure II.06	DISPOSITION 5 — Configuration mixte (about + voiles centraux)
Figure II.07	DISPOSITION 6 — Configuration 6 (excentricité non conforme)
Figure II.08	DISPOSITION 7 — Voiles répartis
Figure III.01	Périodes fondamentales T1 des cinq configurations conformes
Figure III.02	Taux de participation des voiles aux charges latérales selon EX et EY
Figure III.03	Volume de béton des voiles par configuration (m^3)
Figure III.04	Masse d'acier des voiles par configuration (kg)
Figure III.05	Coût global des matériaux par configuration : volume de béton (m^3) et masse d'acier (kg)

Optimisation du contreventement mixte en portiques-voiles des bâtiments en béton armé

Résumé

Ce mémoire porte sur l'optimisation du contreventement mixte en portiques-voiles des bâtiments en béton armé, en zone sismique III selon le RPA 99/2003. Sept configurations de disposition des voiles de contreventement ont été modélisées et analysées à l'aide du logiciel ETABS. Deux configurations ont été éliminées en raison d'une excentricité excessive entre le centre de masse et le centre de rigidité (DISPOSITION 4 : ey/LY = 29,47 % ; DISPOSITION 6 : ey/LY = 14,49 %). Les cinq configurations conformes ont été comparées selon trois critères : la rigidité dynamique (période fondamentale T1), l'équilibre du contreventement dans les deux directions, et le coût global des matériaux (volume de béton et masse d'acier des voiles). Les résultats montrent que la DISPOSITION 2 — voiles en about simple de longueur L = 2 m — constitue la solution optimale : elle présente le bilan matériaux le plus favorable (89,32 m³ de béton et 9 115 kg d'acier), une rigidité satisfaisante (T1 = 0,582 s), et un excellent équilibre de contreventement (ex/LX = 1,50 %, ey/LY = 4,81 %), tout en respectant l'ensemble des prescriptions réglementaires du RPA 99/2003.

Mots-clés : Contreventement mixte, Portiques-voiles, Béton armé, Optimisation, Voiles en about, ETABS, RPA 99/2003.

Optimization of Mixed Frame–Shear Wall Structural Systems in Reinforced Concrete Buildings

Abstract

This thesis focuses on the optimization of composite bracing in reinforced concrete buildings using frames and shear walls, in seismic zone III according to RPA 99/2003. Seven shear wall configurations were modeled and analyzed using ETABS software. Two configurations were eliminated due to excessive eccentricity between the center of mass and the center of stiffness (CONFIGURATION 4: ey/LY = 29.47%; CONFIGURATION 6: ey/LY = 14.49%). The five remaining configurations were compared according to three criteria: dynamic stiffness (fundamental period T1), bracing equilibrium in both directions, and overall material cost (concrete volume and steel mass of the shear walls). The results show that ARRANGEMENT 2 — simple butt walls of length L = 2 m — is the optimal solution: it offers the most favorable material balance (89.32 m³ of concrete and 9,115 kg of steel), satisfactory stiffness (T1 = 0.582 s), and excellent bracing balance (ex/LX = 1.50%, ey/LY = 4.81%), while complying with all the regulatory requirements of RPA 99/2003.

Keywords: Composite bracing, Frame-walls, Reinforced concrete, Optimization, Butt walls, ETABS, RPA 99/2003.

تحسين نظام التدعيم المختلط بالإطارات والجدران القصّية في المباني

الخرسانية المسلحة

ملخص

تتناول هذه المذكرة تحسين نظام التدعيم المختلط في المباني الإطارية ذات الجدران في الخرسانة المسلحة، في منطقة زلزالية من الفئة الثالثة وفق نظام .RPA 99/2003 تم نمذجة وتحليل سبع توزيعات لجدران التدعيم باستخدام برنامج .ETABS تم رفض توزيعَين بسبب اللاتمركز المفرط بين مركز الكتلة ومركز الصلابة. وقد تمت مقارنة التوزيعات الخمس المطابقة للمتطلبات وفق ثلاثة معايير: الصلابة الديناميكية، التوازن في الاتجاهين، والتكلفة الإجمالية للمواد. أظهرت النتائج أن التوزيع 2 —جدران طرفية بطول 2 = L م يمثل الحل الأمثل، بأدنى استهلاك للمواد (89.32 م^3 خرسانة و9115 كغ حديد) وصلابة مقبولة 0.582 = T1) ث (مع الامتثال الكامل لمتطلبات.RPA 99/2003

الكلمات المفتاحية :تدعيم مختلط، إطارات وجدران، خرسانة مسلحة، تحسين، جدران طرفية، ETABS، .RPA 99/2003

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements II
Dédicace III
Liste des Abréviations IV
Liste des Figures V
Résumé / Abstract / ملخص VII
Introduction Générale 1
Chapitre I : Synthèse Bibliographique 2
I.1. Systèmes de contreventement des bâtiments 3
I.2. Contreventement horizontal (Diaphragme) 4
I.3. Contreventement par voiles en béton armé 9
I.4. Système structural mixte portiques–voiles 14
I.5. Performance des contreventements mixtes 15
I.6. Importance de l'utilisation des voiles 20
I.7. Optimisation des Contreventements Mixtes 24
I.8. Objectifs 33
Chapitre II : Modélisation et Présentation de l'Ouvrage 34
II.1. Présentation de l'ouvrage 34
II.2. Approche de modélisation 38
II.3. Configurations étudiées 46
II.4. Dispositions adoptées 46
Chapitre III : Résultats et Discussion 51
III.1. Calcul des sections des éléments structuraux 51
III.2. Étude paramétrique et analyse comparative 53
Conclusion Générale 62
Références Bibliographiques 63

Introduction Générale

Le secteur du bâtiment en Algérie est soumis à une contrainte fondamentale et permanente : concevoir des structures capables de résister efficacement aux actions sismiques, en particulier dans les régions à forte activité sismique. Les événements tragiques survenus par le passé, notamment le séisme de Boumerdès en 2003, ont mis en lumière les insuffisances de certaines conceptions structurales et ont rappelé l'importance d'une approche rigoureuse, encadrée par des normes parasismiques adaptées, en l'occurrence **le Règlement Parasismique Algérien RPA 99/2003**.

Pour répondre à cet impératif de sécurité, le système de contreventement mixte, associant portiques et voiles en béton armé, s'est imposé comme l'une des solutions structurales les plus fiables et les plus répandues. Cependant, la démarche conventionnelle de conception repose encore largement sur une approche empirique, où l'ingénieur ajuste manuellement la disposition des voiles jusqu'à l'obtention de résultats jugés satisfaisants. Cette méthode, bien qu'opérationnelle, ne garantit ni la meilleure réponse dynamique possible, ni l'optimisation des performances sismiques de la structure.

C'est dans cette optique que s'inscrit le présent travail de recherche. Ce mémoire a pour objectif principal de réaliser une étude comparative systématique de plusieurs configurations de contreventement mixte portiques-voiles, modélisées sous le logiciel **ETABS**, afin d'identifier les dispositions les plus performantes en zone sismique algérienne. Ce travail est structuré en trois chapitres :

Le Chapitre I pose les fondements théoriques : systèmes de contreventement, comportement du système mixte portiques-voiles, et revue de littérature sur l'optimisation des voiles de contreventement.

Le Chapitre II est consacré à la modélisation : présentation de l'ouvrage étudié, prédimensionnement des éléments structuraux, et mise en place des différentes variantes de contreventement dans ETABS.

Le Chapitre III présente les résultats obtenus, l'analyse comparative des performances dynamiques de chaque variante, et les conclusions issues de l'étude paramétrique.

Chapitre I
Synthèse bibliographique

Introduction

Le secteur du génie civil en Algérie est confronté à un défi permanent : concevoir des structures capables de résister aux phénomènes sismiques, particulièrement dans les zones à forte activité tellurique. Pour répondre à cet impératif de sécurité, le système de contreventement mixte, combinant portiques et voiles en béton armé, s'est imposé comme l'une des solutions les plus fiables et les plus utilisées, conformément au **Règlement Parasismique Algérien RPA 99/2003**.

Cependant, la conception traditionnelle repose souvent sur une approche empirique de type « essais et erreurs », où l'ingénieur positionne manuellement les voiles jusqu'à l'obtention de résultats satisfaisants. Cette méthode, bien qu'efficace, ne garantit pas nécessairement la configuration la plus performante sur le plan dynamique.

Ce premier chapitre a pour objectif de poser les fondements théoriques nécessaires à la compréhension de notre étude. Nous aborderons les généralités sur les systèmes de contreventement, le comportement spécifique du système mixte portiques-voiles, ainsi que les travaux de recherche portant sur l'optimisation de la disposition des voiles dans les bâtiments en béton armé.

I.1. Systèmes de contreventement des bâtiments

I.1.1. Contreventement

En génie civil, un contreventement est un système statique destiné à assurer la stabilité globale d'un ouvrage vis-à-vis des effets horizontaux issus des éventuelles actions sur celui-ci (par exemple : vent, séisme, choc, freinage, etc.). Il sert également à stabiliser localement certaines parties de l'ouvrage (poutres, poteaux) relativement aux phénomènes d'instabilité (flambage ou déversement). Afin d'assurer la stabilité globale d'un bâtiment, il est nécessaire que celui-ci soit contreventé selon au moins 3 plans verticaux non colinéaires et un plan horizontal ; on distingue donc les contreventements verticaux (destinés à transmettre les efforts horizontaux dans les fondations) des contreventements horizontaux (destinés à s'opposer aux effets de torsion dus à ces efforts). Un contreventement peut être réalisé par des voiles (contreventements verticaux) ou des plaques (contreventements horizontaux) en béton armé, en maçonnerie, en bois ou en tôle ondulée ; ou par des treillis en bois ou en acier [1].

I.1.2. Principe de contreventement

Le contreventement d'un bâtiment doit être pensé dès sa conception, car ce sont la géométrie globale et le positionnement en plan des éléments les plus rigides qui déterminent en grande partie la bonne répartition des efforts dans la structure. A l'opposé, les formes en U ou L sont à éviter car elles posent des problèmes de concentration de contraintes au niveau des angles et font apparaitre de la torsion d'ensemble. La disposition en plan des éléments de contreventement est également très importante. Un mauvais positionnement implique une torsion du plancher qui génère des efforts supplémentaires dans les éléments de contreventement [1].

I.1.3 Choix du contreventement

Le contreventement permet d'assurer une stabilité horizontale et verticale de la structure lors des secousses qui rappelons-le ont des composantes dans les trois directions.

Le rôle du contreventement horizontal est de transmettre les actions latérales aux éléments verticaux appelés palées de stabilité.

Pour assurer le contreventement horizontal, les planchers et toitures faisant office de diaphragme rigide ne devraient pas être affaiblis par des percements trop grands ou mal placés pouvant nuire à leur résistance et leur rigidité.

Les diaphragmes flexibles devraient être évités afin de limiter les déplacements horizontaux et les effets de torsion.

Le contreventement permet également d'eviter le déversement des murs, notamment ceux réalisés en maçonnerie.

Le contreventement vertical par palées devrait répondre à des critères spécifiques tels que :

- **Leur nombre** : au moins trois palées non parallèles et non concourantes par étage.
- **Leur disposition** : elles seront situées le plus symétriquement possible par rapport au centre de gravité des planchers et de préférence aux angles avec une largeur suffisante.
- **Leur distribution verticale** : être régulière ; les palées seront de préférence superposées

Afin de conférer aux différents niveaux une rigidité comparable aussi bien en translation qu'en torsion [1].

I.1.4 Rôle de contreventement

Le contreventement a donc principalement pour objet :

- ✓ Assurer la stabilité des constructions non auto-stables vis-à-vis des charges horizontales (celle des structures auto-stables étant assurée intrinsèquement) donc de transmettre ces charges jusqu'au sol.
- ✓ Raidir les constructions, Car les déformations excessives de la structure sont source de dommages aux éléments non structuraux et à l'équipement.

Dans le cas d'une construction parasismique, le contreventement comporte obligatoirement deux familles d'éléments :

- ✓ Contreventement horizontal (diaphragme)
- ✓ Contreventement vertical (murs, travées triangulées ou portiques [2].

I.2. Contreventement horizontal (Diaphragme)

Le contreventement horizontal est réalisé généralement par des dispositions constructives au niveau des planchers et de la toiture. Il est assuré soit par la création d'un diaphragme, soit par la réalisation de poutres au vent généralement obtenues par triangulation, on parle d'effet diaphragme lorsque les planchers sont suffisamment rigides pour qu'on puisse considérer qu'ils ne se déforment pas sous l'effet des forces horizontales (agissant dans le plan du plancher), ce qui permet de faire l'hypothèse simplificatrice que ces efforts se distribuent ensuite dans les éléments de contreventement au prorata de leurs raideurs [3].

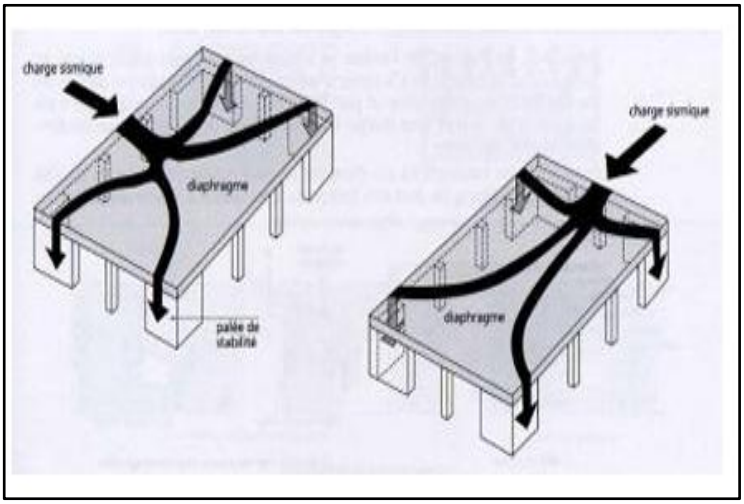


Figure I.1 : Distribution de l'effort horizontal du diaphragme aux contreventements verticaux [3]

I.2.1. Contreventement vertical

L'absence de contreventement vertical parmi les principaux facteurs de ruine en cas de séisme



Figure I.2 : Effondrement total de la structure [4].

Certaines structures comme les ossatures en poteaux et poutres, n'ont fréquemment pas la rigidité Nécessaire pour résister aux charges horizontales. L'adjonction des éléments résistant à ces charges permet alors d'assurer leur stabilité [4].

I.2.2. Différents types de contreventement

Classiquement il y a trois types de contreventement :

I.2.2.1. Remplissage (voile, diaphragme)

On utilise des voiles en béton pour les fortes sollicitations. Pour les faibles sollicitations des voiles en maçonnerie conviennent. Lorsqu'il existe un noyau ou un mur de refend celui-ci peut bien sur servir de contreventements (il s'agit surtout d'un cas pour les bâtiments à étages) [5]

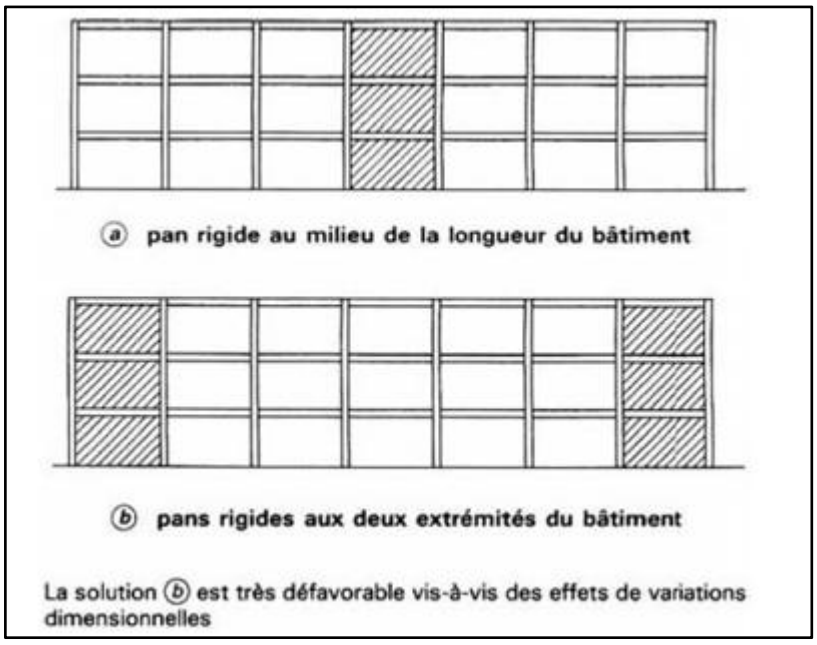


Figure I.3: Contreventement longitudinal d'un bâtiment. Disposition des pans rigides [5]

I.2.3. Cadres (portique)

Ils se justifient pleinement lorsque l'on doit laisser le passage libre, ou pour éviter des diagonales inesthétiques, ou bien parfois pour laisser une plus grande liberté pour une modification de la structure [5].



Figure I.4: Structure contreventé par portique [5]

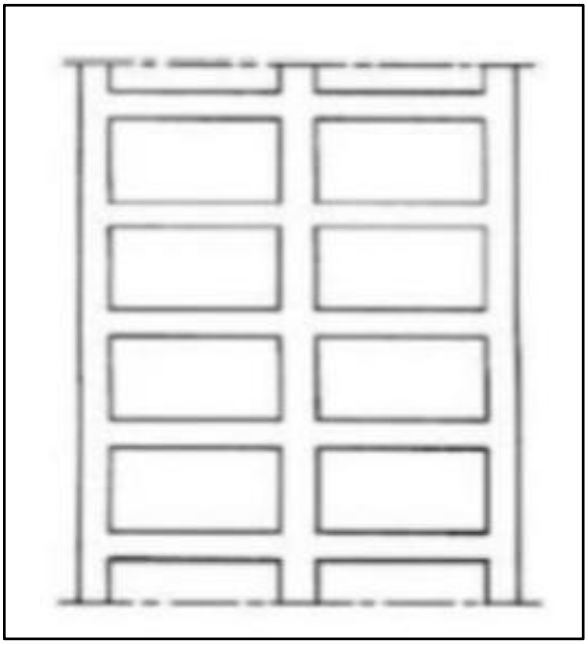


Figure I.5 : Ossature en portiques (à des travées) [5]

I.2.4. Triangulation (treillis)

Il s'agit du type le plus fréquent pour les constructions en acier ; les treillis en N conviennent bien lorsqu'il n'y a pas d'inversion d'efforts. Lorsque l'on est en présence d'inversion d'efforts on préfère les croix de saint André (quelquefois les treillis en K ou V peuvent convenir) [5].



Figure I.6 : Contreventement triangulés [5]

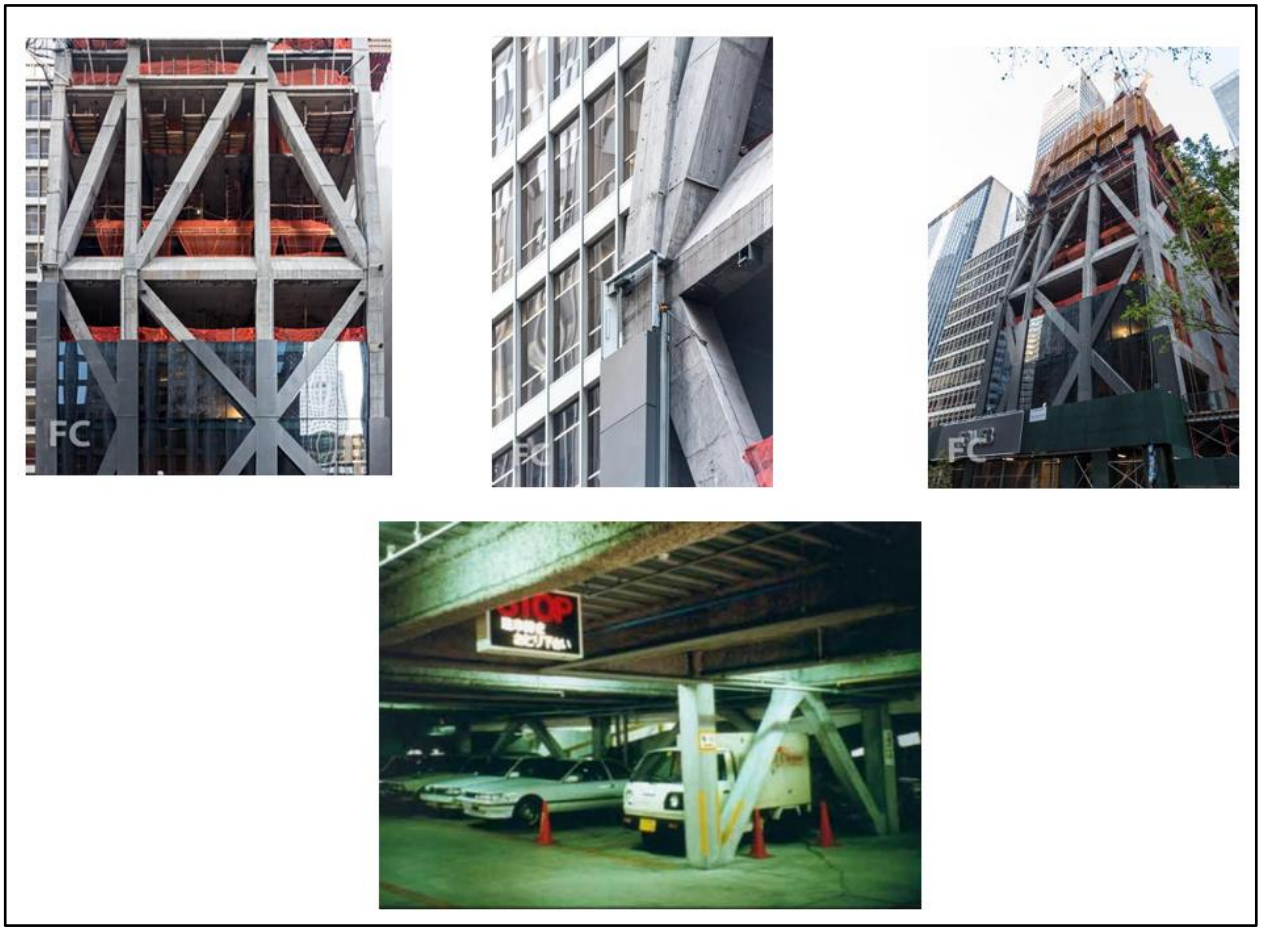


Figure I.7 : Diagonales en béton armé [5]

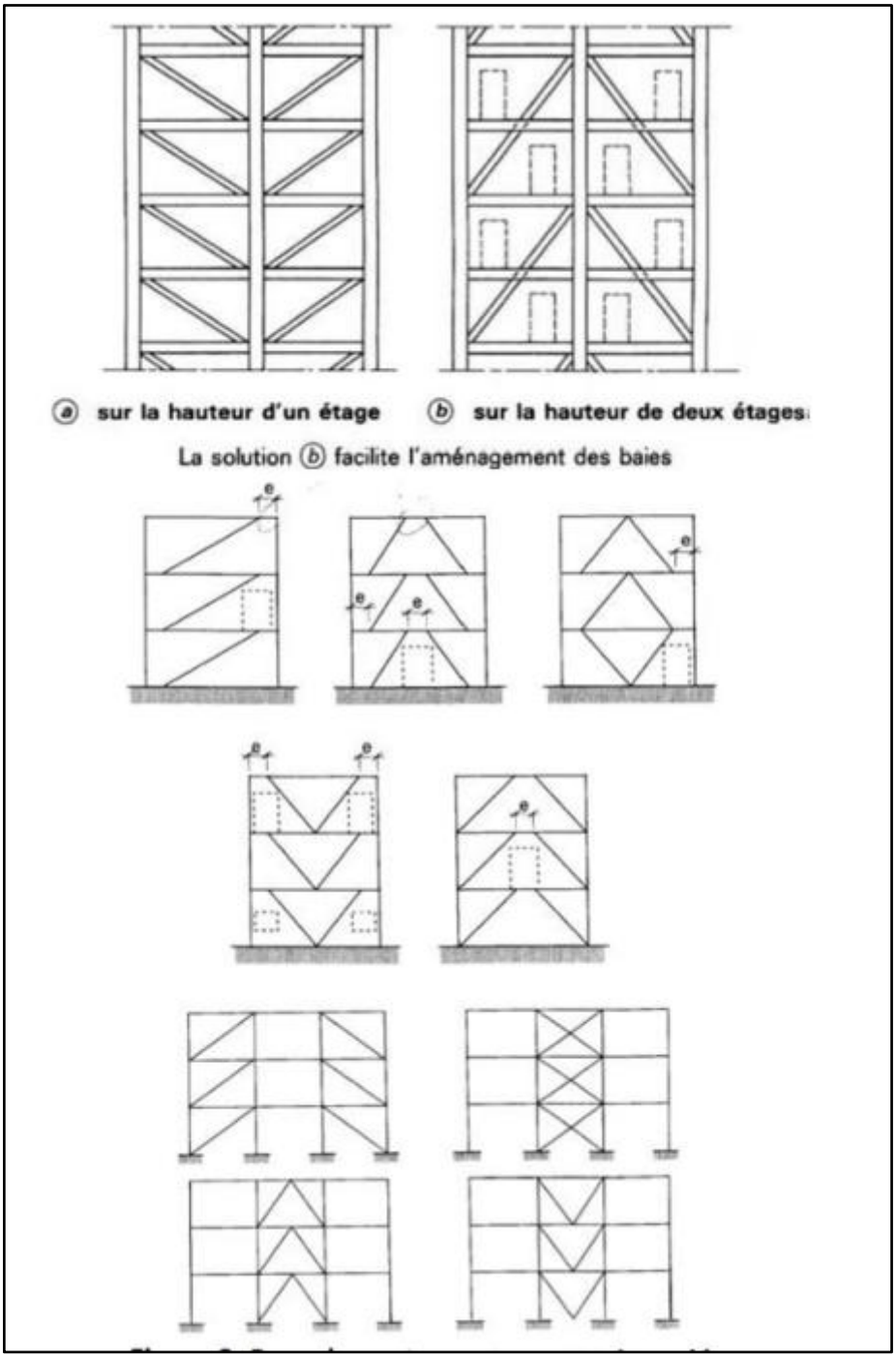


Figure I.8 : Pans de contreventement triangulés [5]

I.3. Contreventement par voiles en béton armé

I.3.1. Définition

Les voiles en béton montrent en général un excellent comportement sous charge sismique. Ils continuent à supporter les planchers et les charpentes même lorsqu'ils sont largement fissurés, ce qui est essentiel pour La sauvegarde des vies humaines. Lorsqu'ils sont élancés, les voiles se comportent comme des consoles verticales, subissant les contraintes maximales sur leurs bords, Il est par

conséquent souhaitable de renforcer les extrémités de ces voiles par des poteaux ou retours d'angle d'une manière générale, le système de renforcement par voiles en béton armé permet une transmission plus efficace et à moindre coût des efforts horizontaux de la structure existante à la nouvelle structure, grâce à la présence de nombreux points de liaison.



Figure I.9 : bâtiment à des voiles en béton armé [6]

I.3.2. Types de voiles

- ✓ Voile simple rectangulaire (droit ou I) d'épaisseur t et de longueur h.
- ✓ Voile composé de plusieurs voiles simples, en forme de T, U, L, H, Z, baïonnette …etc. Assemblés de façon à forme un ensemble rigide Nous retiendrons, pour la suite, sous le terme de voile :
- ✓ Les murs en maçonnerie.
- ✓ Les refends qui sont des voiles ou murs de grande longueur. [6]

I.3.3. Disposition des voiles de contreventement

Les éléments de contreventement doivent être disposés de façon à conférer à la construction une grande rigidité à la torsion.

- ✓ De trois éléments verticaux (au minimum) par niveau, à condition qu'ils soient non concourants et non parallèles.

- ✓ Les plus larges possibles, courant éventuellement sur plusieurs travées. Les éléments étroits sont soumis à des efforts élevés, donnant lieu à des déformations importantes.
- ✓ Disposés en façades ou près des façades conférant ainsi une grande rigidité à la torsion.
- ✓ Constitués éventuellement par un grand noyau central fermé. En effet, la rigidité des noyaux ouverts est faible [6].

I.3.4. Torsion des voiles dans les structures

La torsion d'ensemble survient lorsque le centre de rigidité de la structure se trouve décalé par rapport au centre des masses, c'est notamment le cas lorsque les éléments de contreventement sont répartis d'une manière asymétrique par rapport au centre de gravité de la structure.

Ce type de sollicitation est mal toléré par la structure, car l'ouvrage vrille autour d'un axe vertical au lieu de fléchir comme un bloc, subissant ainsi à chaque niveau des déplacements horizontaux différents La construction est soumise à une torsion d'axe vertical d'autant plus importante que la distance entre le centre des masses et le centre de rigidité est grande, ainsi les poteaux situés aux extrémités du bâtiment peuvent subir des déplacements différentiels importants entre leurs tête set leurs pieds, déplacements pouvant entraîner leur destruction [6].

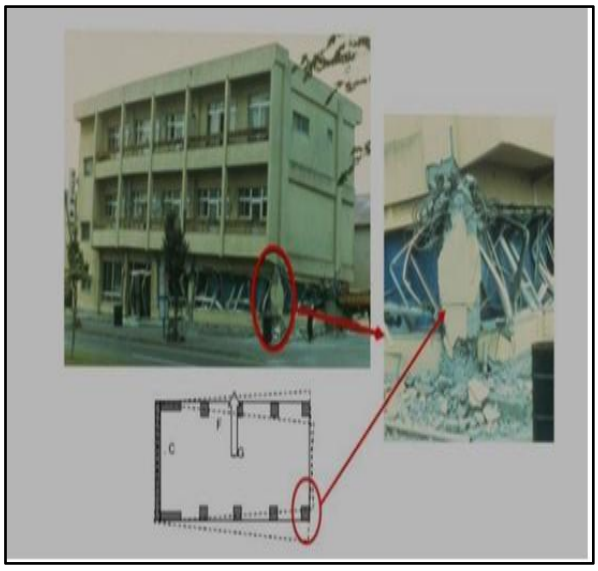


Figure I.10 : Plastification d'un poteau d'angle due à la disposition Asymétrique des voiles [6]

I.3.5. Classification des structures avec voiles de contreventement

Vue la grande variété des constructions. Trois grandes catégories peuvent être rencontrées :

- ✓ Structures « mixtes » avec des murs porteurs associés à des portiques.
- ✓ Structures à noyau central.
- ✓ Structures uniquement à murs porteurs.

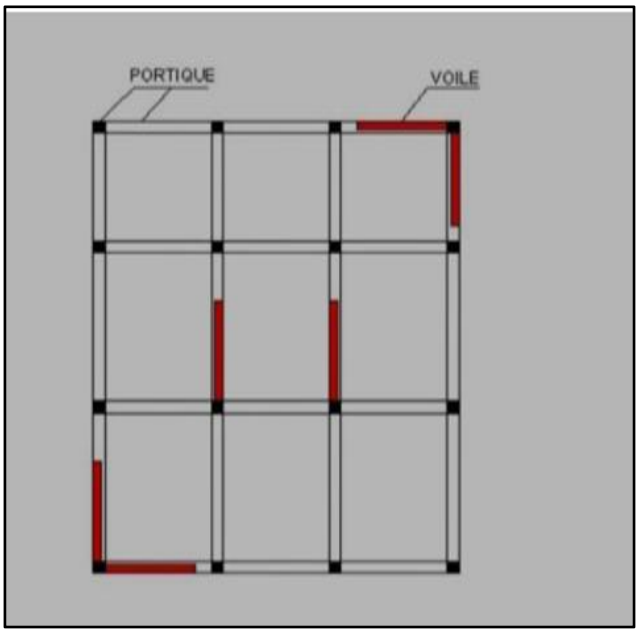


Figure I.11 : Structure « mixte » avec des murs porteurs couplés à des portiques [6]

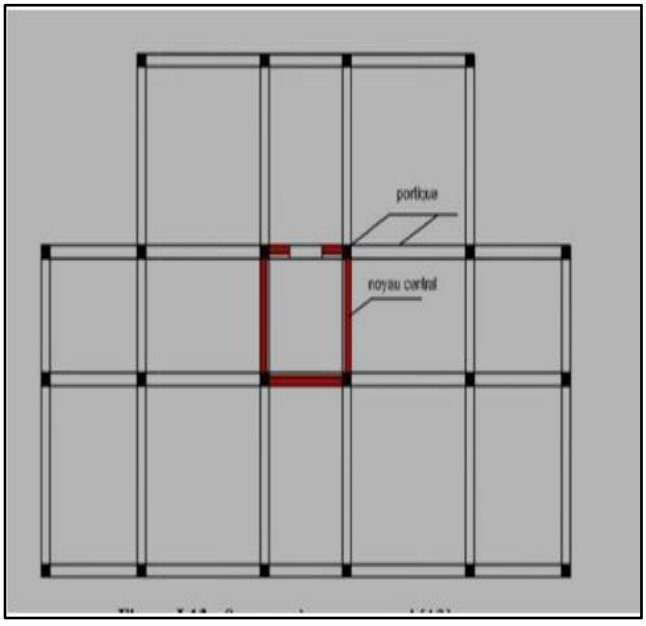


Figure I.12 : Structure à noyau central [6]

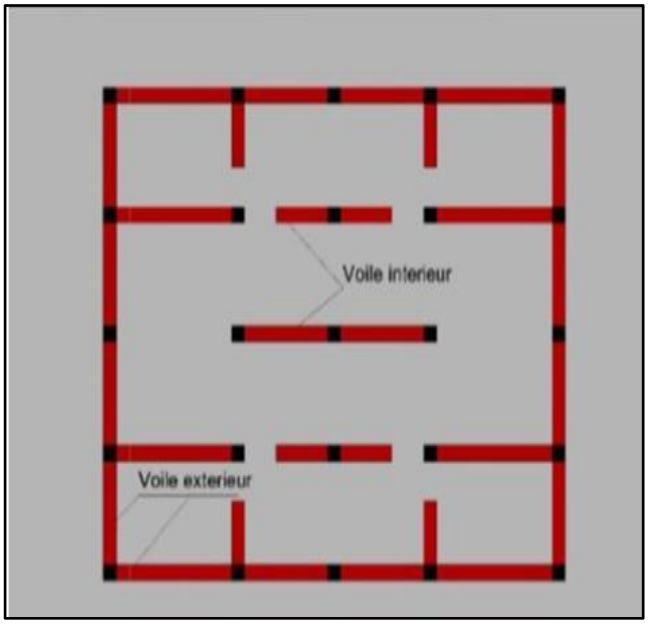


Figure I.13 : Structure uniquement à murs porteurs [6]

I.3.5. Fonctions des voiles

- La stabilité mécanique sous les sollicitations provenant des charges appliquées ou des déformations imposées par les phénomènes thermiques, climatiques et de retrait.
- La sécurité en cas d'incendie, séisme ou autres sollicitation exceptionnelles normalement prévisibles.
- L'étanchéité à la pluie pour les murs qui y sont exposé.
- Une contribution à la satisfaction des exigences hygrothermiques et acoustiques
- Le cas échéant, l'aspect extérieur et/ou intérieur de la construction [6]

I.3.6. Principales caractéristiques du comportement des voiles

Les principaux paramètres ayant une influence prépondérante sur le comportement d'un voile sont les suivants :

- L'élancement, défini comme le rapport de la hauteur par la largeur du voile, h/1,
- La disposition et le pourcentage des armatures,
- L'intensité de l'effort normal. Du point de vue de leur fonctionnement, il convient de faire la distinction entre les voiles Elancés ($h / 1 > 2$) et le voiles courts ($h / 1 < 2$).

I.4. Système structural mixte portiques–voiles

Le système mixte portiques–voiles, défini par le RPA 99 (article 3.4.4.a), repose sur l'association de portiques en béton armé et de voiles structuraux, afin de tirer parti de leurs caractéristiques mécaniques complémentaires. En effet, les portiques se distinguent par leur capacité de déformation inélastique, assurant ainsi une bonne ductilité et une dissipation efficace de l'énergie sismique, tandis que les voiles présentent une rigidité élevée, leur permettant de reprendre efficacement les efforts horizontaux et de limiter les déplacements latéraux de la structure.

Dans ce système, la répartition des efforts sismiques doit satisfaire une condition essentielle imposée par la réglementation, à savoir que les voiles doivent reprendre au moins 75 % de l'effort tranchant à la base. Cette exigence garantit que la rigidité globale de la structure est principalement assurée par les voiles, conférant ainsi à l'ouvrage une meilleure stabilité vis-à-vis des actions sismiques. Les portiques interviennent en complément, en contribuant à la redistribution des efforts et en améliorant la ductilité globale du système.

Ainsi, le système mixte portiques–voiles constitue une solution structurale performante en zone sismique, permettant d'assurer à la fois une résistance élevée aux actions horizontales et un comportement ductile, indispensable pour la sécurité et la pérennité des ouvrages [3].



Figure I.14 : Contreventement mixte d'un bâtiment [3]

I.5. Performance des contreventements mixtes portiques-voiles en BA

Avant les années 1960, les approches de conception des structures de bâtiments étaient essentiellement fondées sur la prise en compte des charges gravitaires, tandis que les effets des actions latérales demeuraient largement négligés. Le dimensionnement des systèmes structuraux visait principalement à assurer la résistance aux charges permanentes et d'exploitation, sans intégration significative des sollicitations horizontales dans les modèles de calcul.

Toutefois, l'intensification du développement urbain, marquée par la prolifération de bâtiments de grande hauteur, ainsi que l'accroissement des connaissances relatives à l'aléa sismique dans diverses régions du monde, ont rapidement mis en évidence les limites de ces pratiques traditionnelles. Il a été démontré que les structures élancées, en particulier celles implantées en zones à forte sismicité, présentent une sensibilité accrue aux actions latérales, notamment celles induites par le vent et les séismes.

Ces sollicitations sont susceptibles de générer des déplacements horizontaux significatifs, pouvant compromettre la stabilité globale des ouvrages, engendrer des dommages structurels majeurs, et, dans les cas extrêmes, conduire à des mécanismes de ruine. Cette évolution des connaissances scientifiques et techniques a conduit à un profond changement de paradigme dans le domaine du génie civil, consacrant la prise en compte des actions latérales comme un élément fondamental du processus de conception et de dimensionnement.

Dans ce contexte, de nouvelles stratégies de conception ont été développées, reposant sur l'intégration de systèmes structuraux à haute performance, tels que les portiques rigides, souvent couplés à des voiles de contreventement. Ces dispositifs permettent d'accroître la rigidité latérale et la capacité de dissipation d'énergie des structures, de limiter les dérives inter-étages et d'améliorer significativement leur comportement sous sollicitations sismiques. Par conséquent, ils contribuent à garantir un niveau élevé de sécurité, de stabilité et de performance globale des bâtiments, en particulier dans des environnements soumis à des actions dynamiques sévères.

Les systèmes structuraux à portiques rigides, dont le comportement repose essentiellement sur la rigidité des assemblages entre éléments, ont été historiquement largement employés dans la conception des bâtiments multi-étages. Toutefois, l'augmentation progressive de la hauteur des constructions a révélé les limites économiques et techniques de ce système pour les ouvrages dépassant une dizaine d'étages. En effet, afin de résister aux efforts latéraux croissants, il devient nécessaire de recourir à des sections de poteaux de plus en plus importantes, particulièrement dans les niveaux inférieurs, ce qui

entraîne une complexité de mise en œuvre ainsi qu'une réduction de la rentabilité globale du système (Khan, 1972).

Par ailleurs, les voiles de contreventement sont reconnus comme des éléments structuraux particulièrement efficaces pour assurer la résistance aux actions horizontales dans les bâtiments en béton armé. La performance globale d'une structure dépend fortement des caractéristiques de ces voiles, notamment leur disposition, leur épaisseur ainsi que les propriétés mécaniques des matériaux utilisés. De nombreuses recherches ont mis en évidence leur rôle essentiel dans l'amélioration du comportement des structures soumises aux actions sismiques et au vent (Chandurkar &Pajgade, 2013 ; Fintel, 1995 ; Rajasekaran, 2009).

Ces éléments, qui s'étendent généralement sur toute la hauteur du bâtiment, assurent une fonction structurale majeure en contribuant à la transmission des charges et à la stabilité globale de l'ouvrage, aussi bien en charge verticale qu'en sollicitation latérale. Néanmoins, il convient de souligner que l'augmentation de la rigidité d'une structure améliore sa résistance aux actions horizontales, mais peut également, dans certains cas, engendrer des modes de rupture défavorables, comme l'ont montré les travaux de Cao et al. (2003).

Il est généralement reconnu que l'intégration conjointe de portiques et de voiles de contreventement au sein d'un même bâtiment constitue une solution structurelle particulièrement efficace en zone sismique. En effet, ce système mixte présente des performances supérieures à celles des structures exclusivement constituées de portiques, notamment en termes de résistance aux actions horizontales. Cette complémentarité entre les deux éléments permet d'assurer un comportement structural plus équilibré, en améliorant simultanément la capacité de reprise des charges verticales et latérales.

L'adoption d'un système mixte portique–voile, qui représente une configuration spécifique des structures en béton armé, permet de combiner les avantages propres à chacun de ces éléments. Dans ce type de système, les voiles en béton armé interagissent avec les portiques, comme illustré à la Figure 1-1, formant ainsi un ensemble composite. Dans cette interaction, les portiques contribuent principalement à la souplesse globale de la structure, tandis que les voiles assurent la rigidité latérale ainsi que la résistance aux sollicitations horizontales.

Cette interaction structurelle permet non seulement d'améliorer significativement la performance sismique globale du bâtiment, mais également d'optimiser l'utilisation des matériaux, en limitant le recours à des éléments porteurs surdimensionnés, tels que les poteaux et les poutres, qui seraient nécessaires dans une structure composée uniquement de portiques. Les avantages de ce système ont été

largement étudiés et documentés dans la littérature, notamment par MacLeod (1970) et Taranath (1988), qui ont démontré son efficacité dans le maintien de l'intégrité structurelle lors d'événements sismiques

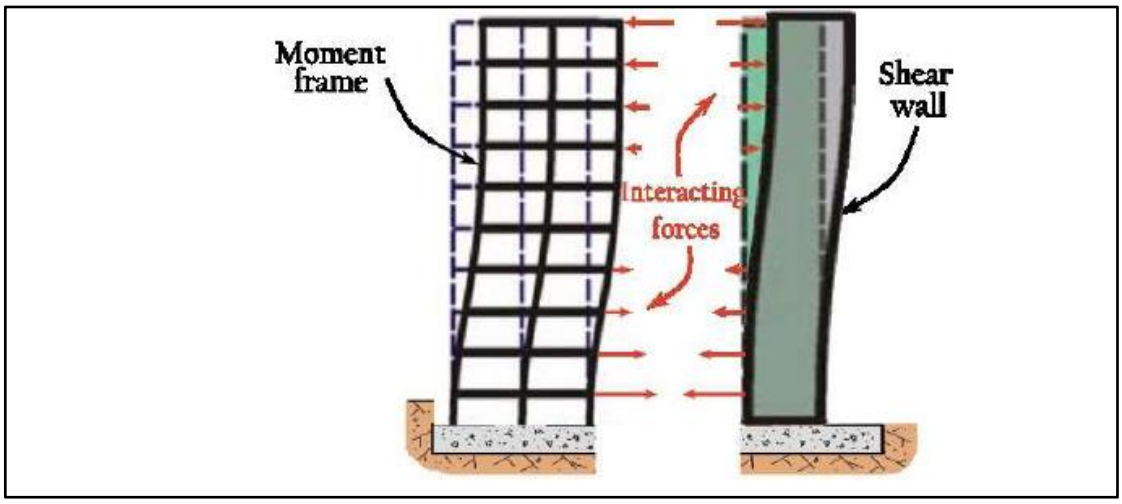


Figure I.14 : Interaction entre les voiles de contreventement et Les portiques (adapté de (Taranath, **1988)) [7]**

Les portiques et les voiles de contreventement présentent des comportements mécaniques distincts sous l'effet des charges latérales, chacun contribuant de manière spécifique à la performance globale des structures. L'efficacité des portiques rigides dans la reprise des charges verticales et horizontales est largement reconnue, principalement en raison de la rigidité des assemblages entre les poutres et les poteaux. Cette rigidité permet une transmission efficace des efforts, conférant ainsi au système un comportement structurel globalement fiable.

Lorsqu'un portique rigide assure à lui seul la reprise des actions latérales, sa réponse structurelle est dominée par un mode de déformation en cisaillement, tel que décrit par MacLeod (1970) et illustré à la Figure -a. Ce comportement s'explique par le fait que les moments internes développés dans les poutres et les poteaux, nécessaires à l'équilibre des efforts horizontaux, deviennent prépondérants. En conséquence, la structure subit des déplacements latéraux qui, bien que généralement acceptables pour les bâtiments de faible hauteur, peuvent devenir significatifs dans les structures élancées, entraînant des oscillations importantes et une possible instabilité globale.

À l'inverse, les voiles de contreventement présentent un comportement principalement flexionnel sous l'action des charges horizontales, analogue à celui d'une console encastrée à sa base,

comme illustré à la Figure -b. Ce mode de fonctionnement permet une répartition progressive des efforts sur toute la hauteur de l'élément, la base étant soumise aux sollicitations maximales. Ce comportement confère aux voiles une rigidité latérale élevée, limitant efficacement les déplacements horizontaux et les dérives de la structure. De ce fait, les voiles de contreventement sont particulièrement adaptés aux bâtiments de grande hauteur, où la maîtrise des déplacements latéraux constitue un enjeu majeur pour la sécurité structurale et la protection des occupants lors d'actions extrêmes telles que les séismes ou les vents forts.

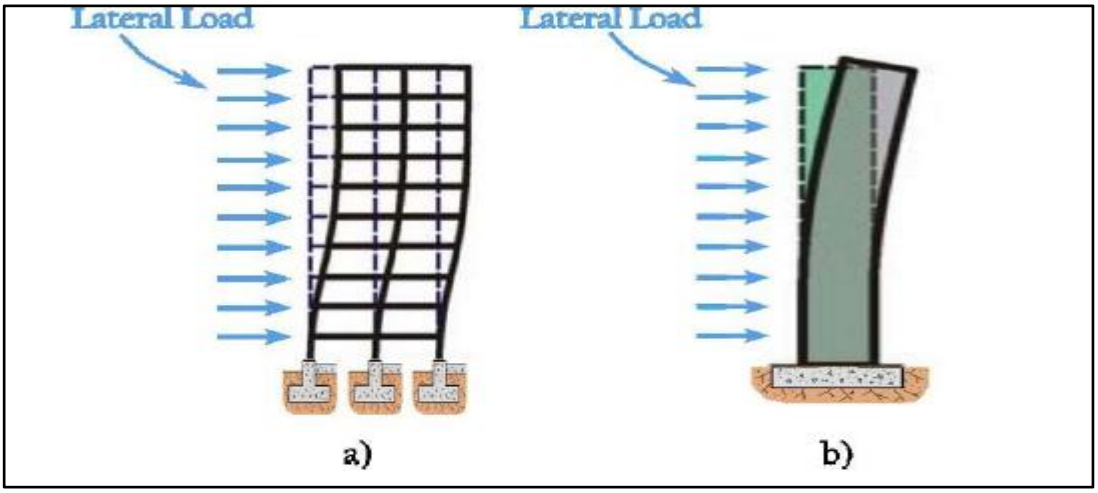


Figure I.15 : Comportement des portiques rigides et des voiles de contreventement sous l'effet des charges latérales : a) mode de déformation en cisaillement ; b) mode de déformation en flexion

La combinaison des systèmes structuraux précédemment décrits, à savoir les portiques rigides et les voiles de contreventement, engendre un comportement global caractérisé par une interaction complexe, résultant des modes de déformation distincts propres à chacun de ces éléments. Cette interaction se traduit par une redistribution des efforts internes, influençant la répartition des forces tranchantes et des moments fléchissant au sein du voile et du portique, comme illustré à la Figure.

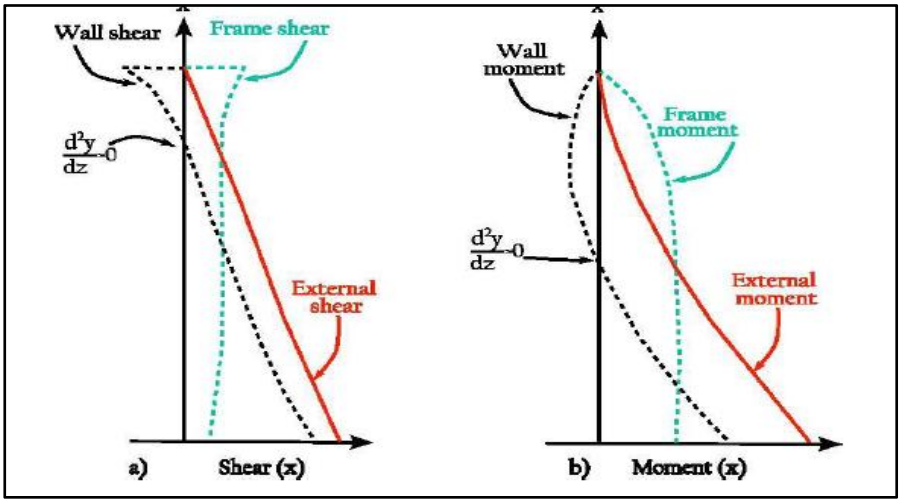


Figure I.16 : Répartition typique a) de l'effort tranchant et b) du moment fléchissant dans Une structure mixte voile–portique (adapté de (Nollet, 1991)).

Le moment fléchissant au sein du voile (Figure 16-b) présente une inversion de signe à une certaine hauteur, correspondant à un point d'inflexion, au-delà duquel le moment interne du voile M_W s'oppose au moment extérieur M_E . Cette inversion traduit une modification du comportement structural, indiquant que l'orientation du moment dans le voile devient contraire à celle de la sollicitation appliquée.

Dans le cas du portique, le moment extérieur est essentiellement équilibré par le développement d'efforts axiaux au sein des éléments verticaux, en particulier les poteaux. Ces efforts axiaux génèrent un couple interne équivalent, permettant d'assurer la résistance au moment appliqué.

$$\text{T. l} = Me - (Mw + M_{ben,Col},)$$

Le moment fléchissant dans les poteaux, noté $M_{ben,Col}$, demeure généralement négligeable en comparaison de la contribution des efforts axiaux. En raison de cette interaction entre les éléments du système mixte, le voile situé au-dessus du point d'inflexion est soumis à des moments de sens opposé à celui de la sollicitation extérieure, tandis que le portique assure principalement la reprise du moment par le biais des efforts axiaux développés dans ses éléments verticaux.

En ce qui concerne la répartition des efforts tranchants (Figure 16-a), il apparaît que la majeure partie du cisaillement externe est reprise par le voile dans les niveaux inférieurs de la structure. En revanche, dans les étages supérieurs, le voile est soumis à un effort tranchant de sens opposé à celui de

l'action appliquée. Par ailleurs, le portique présente une distribution de l'effort tranchant globalement uniforme sur l'ensemble de la hauteur du bâtiment, à l'exception de la zone proche de la base, où une diminution notable de cet effort est observée.

Au sommet de la structure, où l'effort tranchant extérieur devient nul, le portique reprend un effort tranchant positif significatif, compensé par un effort tranchant négatif dans le voile. Cette configuration met en évidence l'existence d'une interaction horizontale concentrée entre ces deux sous-systèmes structuraux.

Par conséquent, la prise en compte de cette interaction horizontale dans un système mixte voile–portique présente plusieurs avantages pratiques :

a) Une réduction des moments fléchissant maximaux dans les voiles de contreventement.
b) Une diminution du déplacement en tête (drift), en comparaison avec les structures constituées uniquement de voiles.

c) Une optimisation du dimensionnement des portiques, résultant d'une répartition quasi uniforme des efforts tranchants sur la hauteur [7].

I.6. Importance de l'utilisation des voiles en béton armé

L'intégration des voiles de contreventement dans la conception des bâtiments constitue un élément fondamental en raison de leur contribution significative à l'amélioration de l'intégrité et des performances structurelles. De manière générale, les bâtiments de moyenne et de grande hauteur requièrent la présence de tels éléments afin d'assurer une résistance efficace face aux actions latérales, notamment celles induites par le vent et les séismes. Dans ce cadre, cette section vise à mettre en évidence l'importance des voiles structuraux, tout en proposant une mise en perspective de leur utilisation dans le contexte algérien.

Au cours des dernières décennies, plusieurs catastrophes naturelles majeures ont marqué l'histoire récente, parmi lesquelles le séisme de Loma Prieta en 1989 aux États-Unis, celui de Kobe en 1995 au Japon, le séisme de Zemmouri en 2003 en Algérie, ainsi que le séisme de Simav en 2011 en Turquie. Ces événements ont engendré des pertes humaines considérables ainsi que des dommages importants affectant les infrastructures et les systèmes essentiels.

Il convient de souligner que, dans certains cas, notamment lors du séisme de Kobe en 1995, certaines structures en béton armé équipées de voiles de contreventement ont démontré une capacité de

résistance remarquable (Ghosh, 1995), comme illustré à la Figure17. Malgré l'ampleur des dégâts observés à l'échelle urbaine, ces bâtiments ont subi des dommages limités sur le plan fonctionnel et ont pu être remis en service dans des délais relativement courts.

À la suite de ces constats, un intérêt scientifique croissant a été accordé aux voiles structuraux. Les études analytiques ont mis en évidence que la faible dégradation observée lors des sollicitations sismiques est principalement attribuable à la rigidité élevée de ces systèmes, permettant de limiter les déformations globales des structures (Wallace & Moehle, 1992, 1993 ; Wood et al., 1987).



Figure I.17 : Un bâtiment hospitalier en béton armé à voiles de contreventement, resté intact, demeure indemne au milieu de dégâts importants causés par un incendie lors du séisme de Kobe de 1995 (Ghosh, 1995).[7]

Le quartier de Marina, à San Francisco, a été sévèrement affecté lors du séisme de Loma Prieta en 1989, un événement d'une magnitude de 6,9 Mw. Parmi les ouvrages endommagés, un bâtiment situé à l'intersection des rues Beach et Divisadero a subi des dégradations particulièrement importantes (Figure 1-5). Selon J.K. Nakata (1995), l'insuffisance de voiles de contreventement au niveau du rez-de-chaussée, notamment dans la zone de stationnement, a constitué un facteur déterminant dans l'amplification des dommages observés.



Figure I.18 : L'insuffisance de voiles de contreventement au niveau du rez-de-chaussée (niveau garage) du bâtiment a entraîné des dommages importants lors du séisme de Loma Prieta de 1989.

À la suite du séisme de magnitude 6,8 de Zemmouri, survenu le 21 mai 2003 et ayant frappé le nord de l'Algérie, de nombreux bâtiments en béton armé ont été fortement affectés par l'intensité de l'événement, entraînant des effondrements ainsi que des dommages structurels considérables. Afin d'évaluer de manière approfondie l'ampleur des destructions et des pertes dans les zones les plus touchées, notamment les wilayas de Boumerdès et d'Alger, une campagne d'expertise technique détaillée a été réalisée.

Les résultats de cette évaluation ont mis en évidence que les structures les plus affectées étaient principalement les bâtiments à portiques en béton armé ainsi que les ensembles résidentiels. Ces ouvrages ont subi des dégradations importantes, contrairement aux structures en béton armé équipées de voiles de contreventement, lesquelles ont présenté globalement un bon comportement sismique (Figure 1-6), avec des dommages limités essentiellement à des fissurations localisées au niveau des joints des panneaux préfabriqués.



Figure I.19 : Bâtiments en béton armé affectés par le séisme de Zemmouri :
(a) avec voiles de contreventement ; b) sans voiles de contreventement.

L'importance des voiles de contreventement s'est particulièrement révélée lors du séisme de Simav survenu en 2011 en Turquie. Cet événement sismique a mis en évidence le rôle essentiel de ces éléments dans la préservation de l'intégrité structurelle des bâtiments, notamment dans les zones à forte sismicité.

Parmi les observations les plus significatives issues de cet événement, figure la vulnérabilité des étages dits « souples » ou « faibles », fréquemment localisés au premier niveau de nombreux bâtiments en béton armé (Doğangün, 2004 ; Sezen et al., 2003). Ces niveaux se caractérisent par une rigidité latérale réduite, des poteaux élancés ainsi qu'une insuffisance de murs de remplissage, ce qui les rend particulièrement sensibles aux dérives latérales importantes (Sezen et al., 2003).



Figure I.20 : Poteaux du premier étage ont subi des dommages sévères, conduisant
Finalement à l'effondrement du bâtiment (Doğangün et al., 2013).

Cependant, l'efficacité des voiles de contreventement réside principalement dans leur capacité à atténuer ces vulnérabilités structurelles. Disposés de manière judicieuse au sein de l'ossature du bâtiment, ils assurent une rigidité et une résistance latérales essentielles. Ils contribuent ainsi à la reprise, à la répartition et à la dissipation des efforts horizontaux générés lors des séismes, limitant de ce fait les déformations globales ainsi que les dommages potentiels subis par la structure.

En définitive, les voiles de contreventement constituent des éléments structuraux fondamentaux en génie civil, particulièrement dans les régions exposées aux actions sismiques ou aux charges de vent importantes. Leur rôle est déterminant dans l'amélioration de la stabilité globale des ouvrages, la limitation des effets des sollicitations horizontales, la réduction des dommages structurels, ainsi que dans l'amélioration de la performance et de la durabilité des bâtiments. Leur intégration représente ainsi une solution incontournable dans la conception de structures sûres et performantes.

Toutefois, il est essentiel de garantir un niveau adéquat de rigidité latérale. Les études relatives aux dommages sismiques ont montré que les structures dotées de voiles présentant une rigidité élevée offrent généralement un bon comportement sous sollicitations sismiques. Néanmoins, une rigidité excessive peut engendrer une augmentation des efforts internes, susceptible d'accentuer les dommages structurels.

Par conséquent, l'optimisation de la conception des voiles consiste à maintenir la rigidité latérale dans une plage optimale, permettant de réduire les dommages induits par les actions sismiques. Cette optimisation repose sur la prise en compte de paramètres tels que la dérive inter-étages et les forces de réponse sismique, afin d'atteindre un compromis satisfaisant entre performance structurelle et économie de construction, sans compromettre l'intégrité de l'ouvrage. Cette démarche contribue ainsi à une conception plus rationnelle, sûre et efficace des bâtiments [8].

I.7. Optimisation des Contreventements Mixtes Portiques-Voiles en BA

L'optimisation des voiles de contreventement en béton armé a conduit les chercheurs à adopter deux principales approches méthodologiques distinctes. La première, dite approche « essai-erreur », repose sur l'expertise des ingénieurs et sur des ajustements itératifs successifs des paramètres de conception, permettant d'aboutir progressivement à des configurations optimales tout en améliorant la compréhension du comportement structural. La deuxième approche s'appuie sur l'utilisation d'algorithmes d'optimisation avancés, offrant un processus automatisé, plus efficace et plus précis dans la recherche de solutions optimales.

I.7.1. Études basées sur l'approche essai-erreur

Dans le domaine de l'optimisation des voiles de contreventement en béton armé, la méthode empirique par essais et erreurs demeure largement utilisée. Elle repose sur l'expérience et le savoir-faire des ingénieurs, qui procèdent à des ajustements progressifs des différents paramètres de conception jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante sur le plan structurel.

Dans ce cadre, l'analyse de l'influence de la surface des voiles sur la performance sismique permet de définir une répartition plus efficiente des éléments de contreventement au sein des bâtiments en béton armé. Cette approche favorise ainsi l'établissement d'un compromis entre efficacité structurelle, sécurité sismique et optimisation des coûts de construction.

À cet égard, l'étude menée par Rajesh Kumar et Bharath Kumar (2018) a examiné l'effet du rapport entre la surface des voiles et la surface totale des planchers sur le comportement sismique d'un bâtiment en béton armé de 15 étages, à l'aide d'une analyse dynamique temporelle non linéaire. Les résultats obtenus montrent qu'une proportion de voiles comprise entre 9,6 % et 14,4 % de la surface totale des planchers contribue significativement à la réduction des dérives inter-étages et des déplacements lors des sollicitations sismiques. Ces conclusions constituent une base importante pour l'optimisation de la conception des structures en béton armé, permettant d'améliorer leur performance sismique tout en maîtrisant les coûts de construction.

Par ailleurs, les bâtiments en maçonnerie armée (RM) sont soumis à des charges verticales ainsi qu'à des actions latérales induites par les séismes et le vent. L'étude menée par Aly et Galal (2020) met en évidence la difficulté d'assurer un comportement ductile dans ce type de structures, notamment sous l'effet de fortes sollicitations axiales.

L'introduction d'une configuration structurale combinant des voiles ductiles et des voiles destinés à la reprise des charges gravitaires permet de réduire de manière significative les taux de voiles ductiles requis par rapport aux systèmes traditionnels à murs porteurs. En effet, alors que les systèmes conventionnels nécessitent généralement des ratios de voiles compris entre 2 % et 3 %, la configuration proposée permet de réduire ce ratio à environ 0,8 %. En outre, l'étude recommande une réduction progressive de la longueur des éléments de rive par paliers de 200 mm tous les trois étages, jusqu'à leur suppression. Cette stratégie contribue à limiter les variations des déformations extrêmes

ainsi que les dérives inter-étages, améliorant ainsi de manière globale la performance sismique des structures.

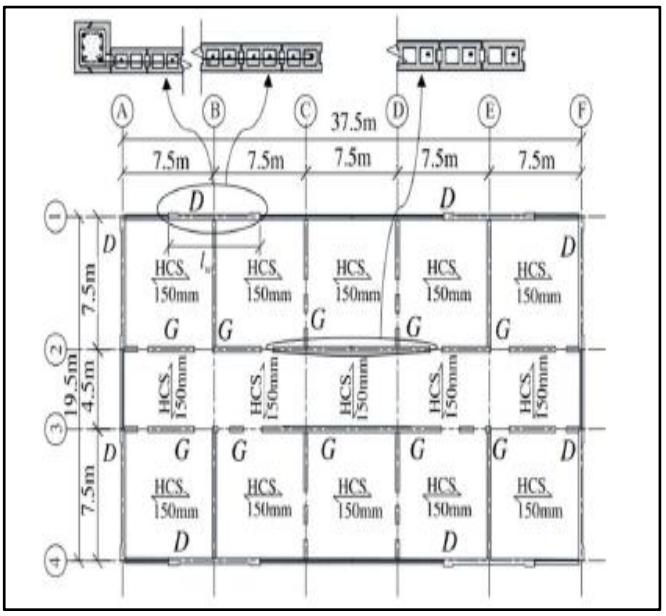


Figure I.21 : Configuration structurelle proposée des voiles de contreventement ductiles (D) et des voiles de reprise des charges gravitaires (G) pour les bâtiments en maçonnerie armée (RM)

Une autre étude menée par Cando et al. (2020) a réalisé une évaluation approfondie de la performance sismique de quatre bâtiments résidentiels types à voiles de contreventement. Cette analyse a porté sur plusieurs paramètres structuraux, notamment la sur-résistance (overstrength), la ductilité en déplacement, les courbes de fragilité associées à l'état limite de sécurité des personnes (Life Safety, LS) et à l'état limite de ruine, ainsi que la probabilité d'atteinte de ces états limite sur une période de référence de 50 ans.

En comparant les quatre configurations étudiées, allant du bâtiment B1 caractérisé par une rigidité élevée au bâtiment B4 présentant une rigidité plus faible, les résultats ont révélé que la probabilité d'atteindre l'état limite de sécurité des personnes est nettement plus élevée pour le bâtiment B4. En effet, cette probabilité est environ trois fois supérieure à celle observée pour le bâtiment B1 sous des sollicitations sismiques correspondant au niveau de conception.

Ces résultats mettent en évidence l'importance d'une rigidité adéquate dans les bâtiments à voiles de contreventement afin d'assurer la sécurité des occupants et de limiter les dommages structurels en cas d'événements sismiques.

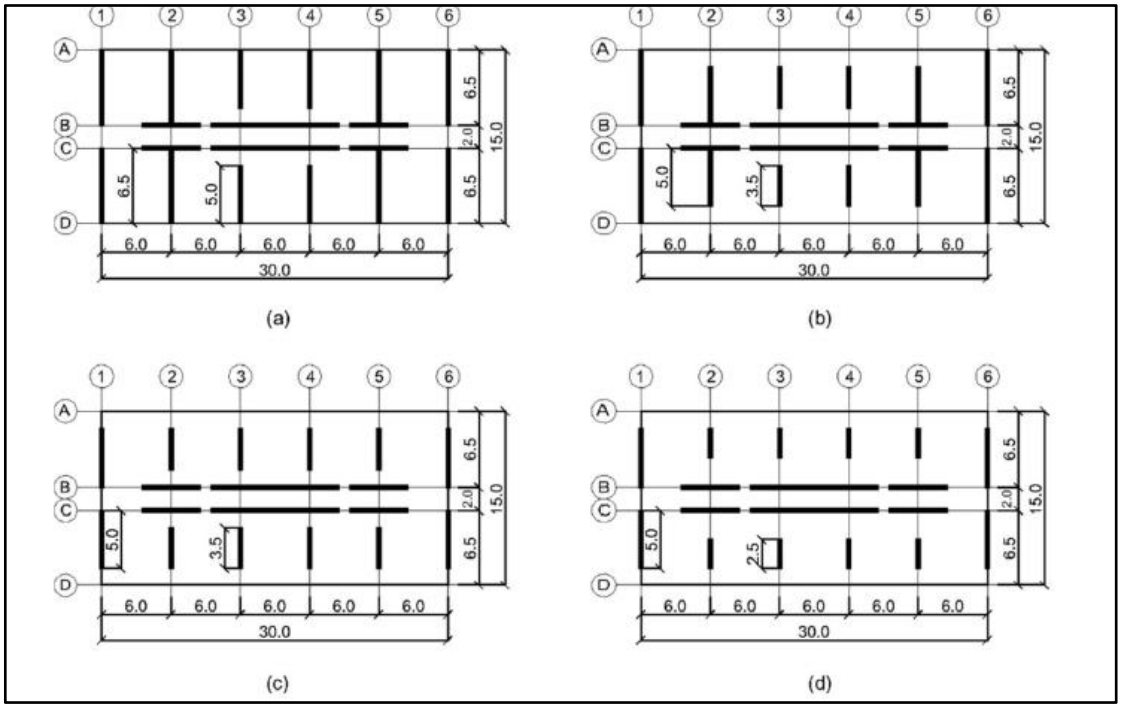


Figure I.22 : Plans de niveaux présentant des zones de voiles de cisaillement
De **1,5 %** (à gauche) et de **2,0 %** (à droite)

Les recommandations relatives aux taux de surface des voiles de cisaillement constituent un outil d'aide à la conception, permettant d'orienter les ingénieurs et les concepteurs vers une optimisation des bâtiments en vue d'atteindre les performances sismiques requises. Dans ce cadre, Soydaş (2009) a étudié l'influence de différents ratios de voiles de cisaillement sur les dérives inter-étages dans des structures en béton armé conçues conformément aux prescriptions du code sismique turc (Figure 11). L'étude, basée sur l'analyse de 45 modèles de bâtiments présentant des proportions variables de voiles, a également permis d'évaluer le caractère conservatif des dispositions réglementaires en matière de performance sismique.

Par ailleurs, cette recherche met en évidence l'impact des différentes configurations de voiles de cisaillement sur le comportement global des structures. Les résultats obtenus offrent ainsi aux ingénieurs et aux concepteurs des éléments pertinents pour optimiser la disposition des voiles en fonction des typologies de bâtiments et des niveaux d'aléa sismique considérés. Cette démarche d'optimisation vise à déterminer le ratio de voiles le plus adéquat, permettant d'assurer les objectifs de performance tout en minimisant les coûts de construction.

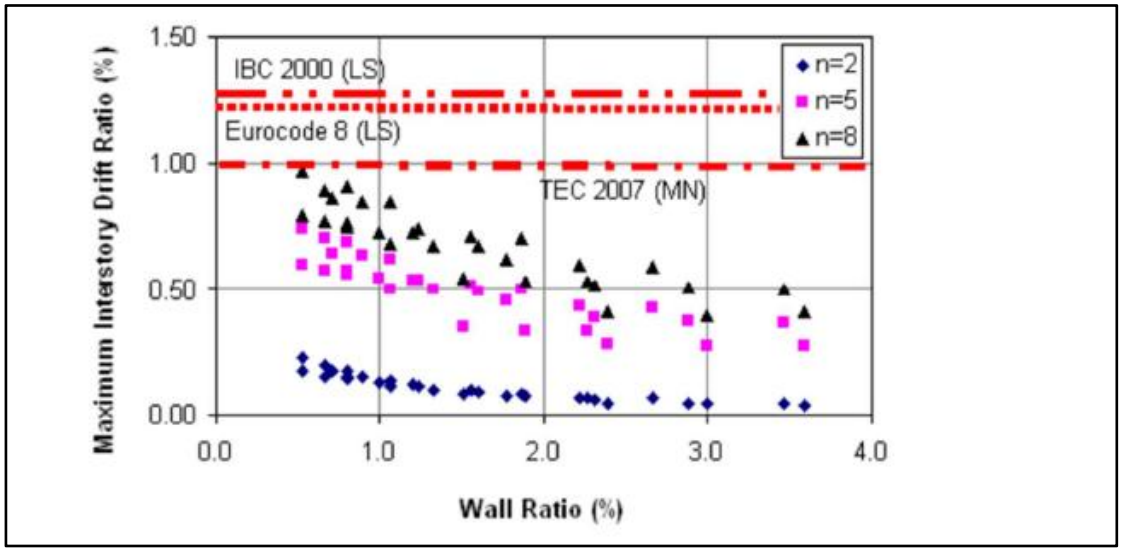


Figure I.23 : Rapports maximaux de dérive élastique inter-étages
Et limites de dérive (Soydaş, 2009).

De manière analogue, Burak et Çömlekoğlu (2013) ont analysé l'influence du rapport entre la surface des voiles de cisaillement et la surface des planchers sur le comportement sismique des bâtiments de moyenne hauteur de type voiles–portiques. Dans cette étude, des taux de voiles compris entre 0,51 % et 2,17 % ont été considérés, les structures étant soumises à différents enregistrements sismiques représentatifs.

Les résultats obtenus montrent qu'un taux de voiles de cisaillement d'environ 1,0 % est recommandé afin d'assurer un contrôle efficace des dérives inter-étages dans les structures de type voiles–portiques.

Cette recommandation constitue ainsi un repère pertinent pour les ingénieurs et les concepteurs, leur permettant d'optimiser la conception des bâtiments en vue d'atteindre les performances sismiques requises.

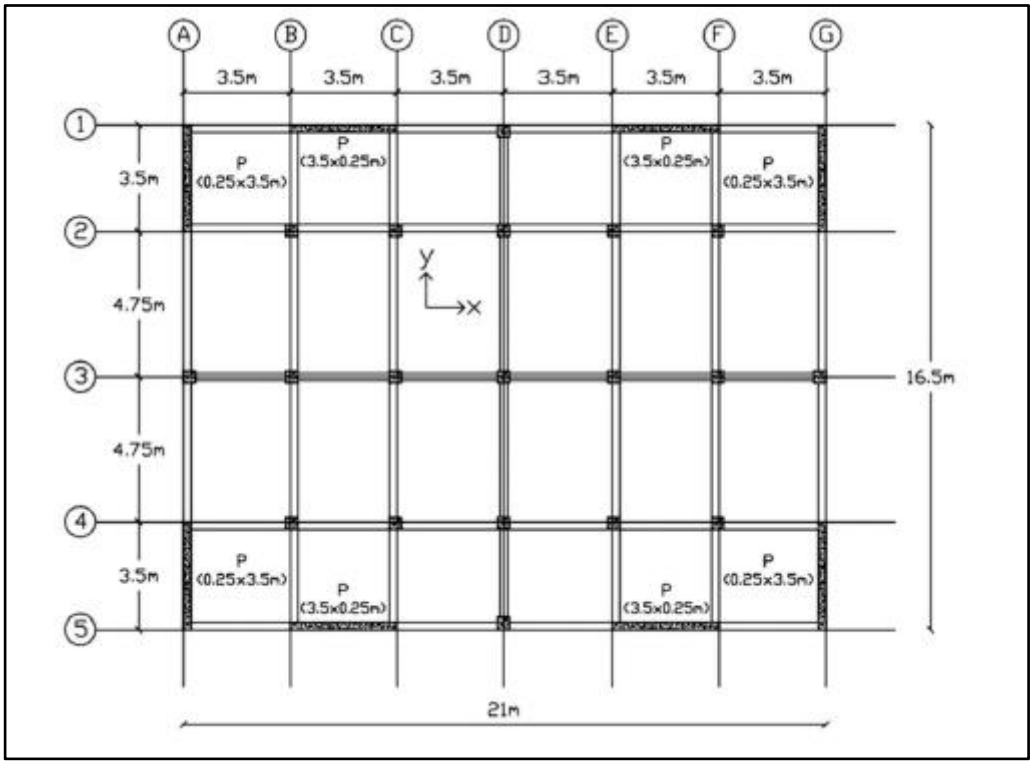


Figure I.24 : Géométrie du bâtiment à voiles-portiques avec un ratio de voiles De cisaillement de 1,0 % (Burak &Çömlekoğlu, 2013).

La maîtrise de l'importance du maintien d'un plan régulier dans les bâtiments de grande hauteur permet d'optimiser la disposition des voiles de cisaillement, tout en limitant l'apparition d'irrégularités structurelles ainsi que les phénomènes de torsion. Dans ce cadre, l'étude réalisée par Pavani et al. (2015) a porté sur l'analyse détaillée d'un bâtiment de 45 étages. Les auteurs ont mis en évidence la nécessité de conserver une configuration régulière du plan à partir du niveau du podium (4^{e} étage), afin d'éviter les discontinuités de rigidité et les effets de torsion dans la structure.

Afin d'assurer la stabilité globale sous sollicitations sismiques, une approche itérative basée sur la méthode essai-erreur a été adoptée. Dans un premier temps, les voiles de cisaillement ont été modélisés avec des dimensions uniformes sur toute la hauteur du bâtiment. Lorsque ces dimensions se sont révélées insuffisantes pour reprendre efficacement les efforts appliqués, elles ont été progressivement augmentées jusqu'à atteindre le niveau de stabilité structurelle requis.

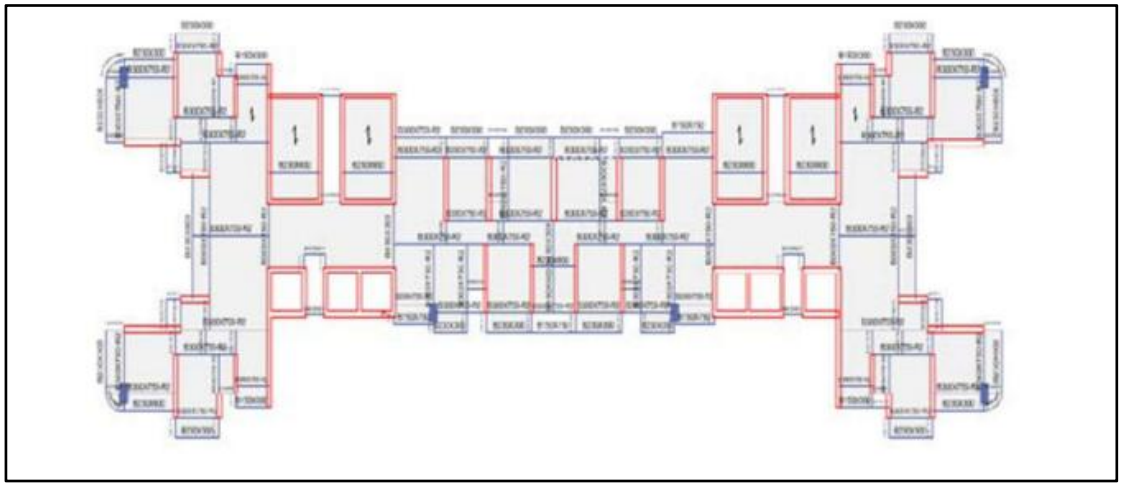


Figure I.25 : Géométrie d'un étage type

Par ailleurs, Banerjee et Srivastava (2020) ont étudié un bâtiment de type G+15 présentant une irrégularité en plan de forme en T (Figure 26). À travers une analyse comparative, les auteurs ont cherché à déterminer la disposition optimale des voiles de cisaillement au sein de la structure. Tout en maintenant constante la longueur totale des voiles, plusieurs configurations ont été examinées à l'aide du logiciel ETABS.

Les résultats obtenus soulignent l'importance déterminante de l'implantation des voiles de cisaillement dans l'efficacité de la répartition des charges verticales et latérales. Cette optimisation permet, en définitive, de réduire les déplacements spectraux, les dérives inter-étages ainsi que les déplacements globaux des niveaux sous l'effet des sollicitations sismiques.

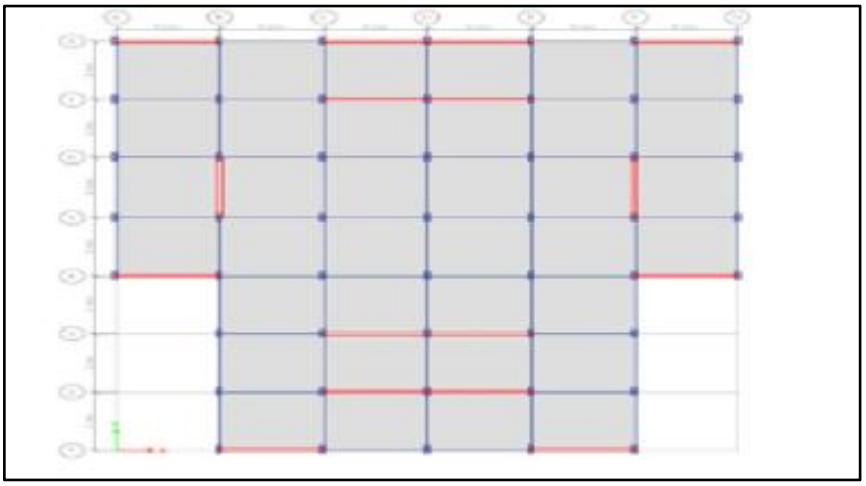


Figure I.26 : Modèle de bâtiment en forme de T **(Model 02)**

L'identification des emplacements optimaux des voiles de cisaillement dans les structures de grande hauteur constitue un levier important pour l'amélioration des systèmes de reprise des efforts latéraux ainsi que pour le renforcement de la stabilité globale des ouvrages. Dans ce cadre, Baral et Ghimire (2021) ont mené une étude visant à déterminer la disposition optimale des voiles dans un bâtiment de type G+7. Six configurations différentes ont été analysées, en considérant plusieurs paramètres de performance tels que le déplacement des étages, la dérive inter-étages, l'effort tranchant, le moment de renversement ainsi que la rigidité globale.

Les résultats obtenus ont montré que le positionnement des voiles au niveau du noyau central du bâtiment conduit à une rigidité maximale, confirmant ainsi leur efficacité en tant que système principal de reprise des charges latérales.

Par ailleurs, l'analyse de la disposition des voiles dans les bâtiments multi-étages permet d'améliorer la répartition des efforts et de réduire les sollicitations horizontales. À cet effet, Patil et al. (2016) ainsi que Titiksh et Bhatt (2017) ont étudié différentes configurations de voiles afin de limiter les effets des charges latérales dans les structures de grande hauteur. Leurs résultats indiquent une performance optimale lorsque les voiles sont placés dans les zones centrales (noyau) des bâtiments.

Dans la même perspective, Suresh (2015) a étudié l'optimisation du positionnement des voiles dans un bâtiment de 21 étages soumis à des sollicitations sismiques. Deux modèles, avec et sans voiles, ont été analysés pour des structures irrégulières situées dans deux zones sismiques distinctes. Les résultats montrent que l'ajout de voiles en périphérie permet une réduction significative des déplacements inter-étages.

De plus, certaines recherches, notamment celles de Banerjee et Srivastava (2020), ont démontré que l'optimisation de la localisation des voiles dans les bâtiments irréguliers permet de réduire les effets de torsion, de limiter les irrégularités structurelles et d'améliorer globalement la performance sismique. Ces auteurs ont proposé un cadre d'analyse visant à identifier la position optimale des voiles dans des structures en forme de « C », avec pour objectif principal la réduction des effets de torsion induits par les irrégularités en plan.

Ce cadre méthodologique repose sur l'évaluation de différentes configurations de positionnement des voiles afin de déterminer celle offrant les meilleures performances structurelles et mécaniques. Une étude de cas portant sur un bâtiment de type G+15 a été réalisée, considérant quatorze configurations différentes tout en maintenant une longueur totale de voiles constante,

correspondant à un ratio surface de voiles/surface de plancher de 14,5 %. Cette analyse a permis d'identifier la configuration optimale répondant le mieux aux exigences de performance structurelle.

Enfin, d'autres travaux se sont intéressés à l'influence des paramètres géométriques et mécaniques des voiles de cisaillement, notamment le rapport de portée et le taux de ferraillage vertical, sur leur comportement structurel. La Figure 27 présente les caractéristiques géométriques, les conditions aux limites ainsi que les dispositions de ferraillage des spécimens étudiés par Miao et al. (2022).

Cette étude a été réalisée à l'aide d'une modélisation numérique à l'échelle méso scopique, permettant une analyse fine du comportement des matériaux et une meilleure compréhension de la réponse structurelle des voiles. Les résultats montrent que l'augmentation du taux de ferraillage vertical améliore légèrement la capacité portante en cisaillement des voiles. Toutefois, son influence sur la ductilité et sur l'effet d'échelle reste négligeable. Ces conclusions constituent une base pertinente pour l'optimisation de la conception et de la performance des voiles en béton armé dans diverses applications structurelles [10].

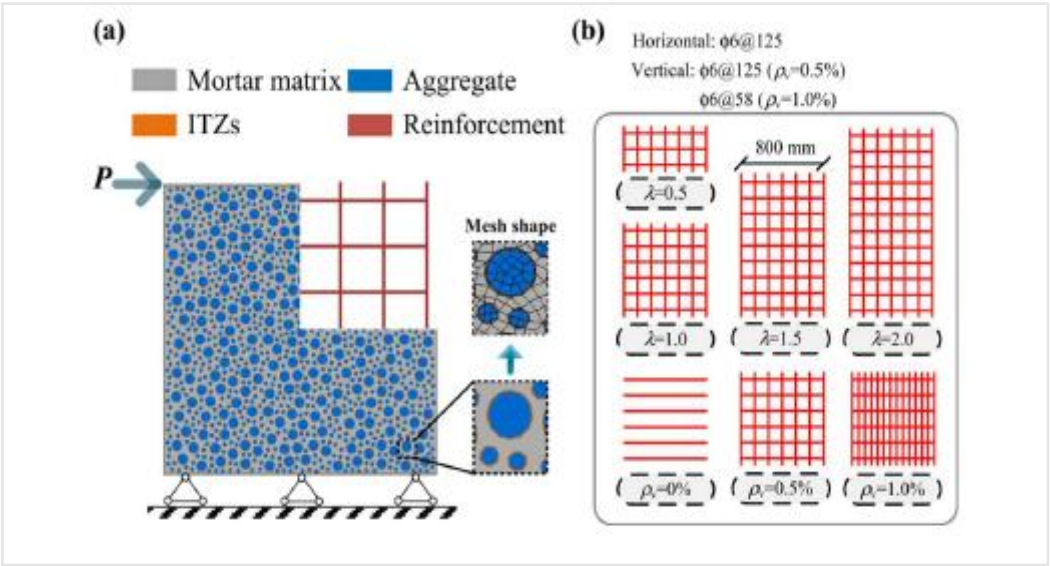


Figure I.27 : a) Modèle mésoscopique d'un voile de cisaillement en béton armé (RC) ; b) rapports de portée de cisaillement λ, taux de ferraillage vertical ρ_v et armatures horizontales [10]

1.8. OBJECTIFS

Le but principal de ce travail consiste à réaliser une étude comparative fondée sur la modélisation de plusieurs variantes de contreventement mixte portiques-voiles à l'aide du logiciel **ETABS**, en vue d'identifier les configurations les plus performantes en zone sismique algérienne.

Les objectifs spécifiques de la recherche sont :

- **Analyse multi-modèles :** modéliser plusieurs configurations de disposition des voiles afin d'analyser l'influence de leur géométrie et de leur répartition sur la réponse sismique de la structure.
- **Évaluation des performances dynamiques :** comparer les résultats fournis par chacun des modèles (périodes propres, déplacements, taux de participation massique) afin de définir les limites et les avantages de chaque configuration.
- **Étude paramétrique :** analyser l'influence de la position, du type d'about et de l'interaction des voiles selon les directions X et Y sur le comportement global de la structure.
- **Vérification de la conformité réglementaire :** s'assurer que tous les modèles testés respectent les dispositions de sécurité imposées par le Règlement Parasismique Algérien **RPA 99/2003**.
- **Constitution d'une base de données comparative :** établir une synthèse des résultats recueillis permettant d'orienter les ingénieurs dans leurs choix de conception en matière de contreventement mixte.

.

Chapitre II : MODÉLISATION ET PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'ouvrage étudié ainsi qu'à la démarche de modélisation adoptée. Nous y décrivons les caractéristiques géométriques et mécaniques de la structure, les hypothèses de modélisation retenues, et les différentes configurations de contreventement mixte portiques-voiles analysées sous le logiciel ETABS.

II.1. Présentation de l'ouvrage

II.1.1. Description générale

L'ouvrage étudié est un bâtiment à usage d'habitation de type R+5, implanté dans la wilaya de Tizi Ouzou, classée en zone sismique III selon le Règlement Parasismique Algérien RPA 99/2003. La structure est en béton armé et adopte un système de contreventement mixte associant des portiques et des voiles.

II.1.2. Caractéristiques géométriques

Paramètre	Valeur
Nombre de niveaux	R+5 (6 niveaux)
Longueur (LX)	20.05 m
Largeur (LY)	11.35 m
Hauteur RDC	4.08 m
Hauteur étages courants	3.65 m
Hauteur totale	22.33 m
Zone sismique	Zone III (RPA 99/2003)
Groupe d'usage	Groupe 2 (Habitation)

II.1.3. Caractéristiques des matériaux

Matériau	Paramètre	Valeur
Béton	Résistance fc28	**25 MPa**
Béton	Module d'élasticité Eb	**32164 MPa**
Acier FeE400	Limite élastique fe	**400 MPa**
Acier FeE400	Module d'élasticité Es	**200 000 MPa**

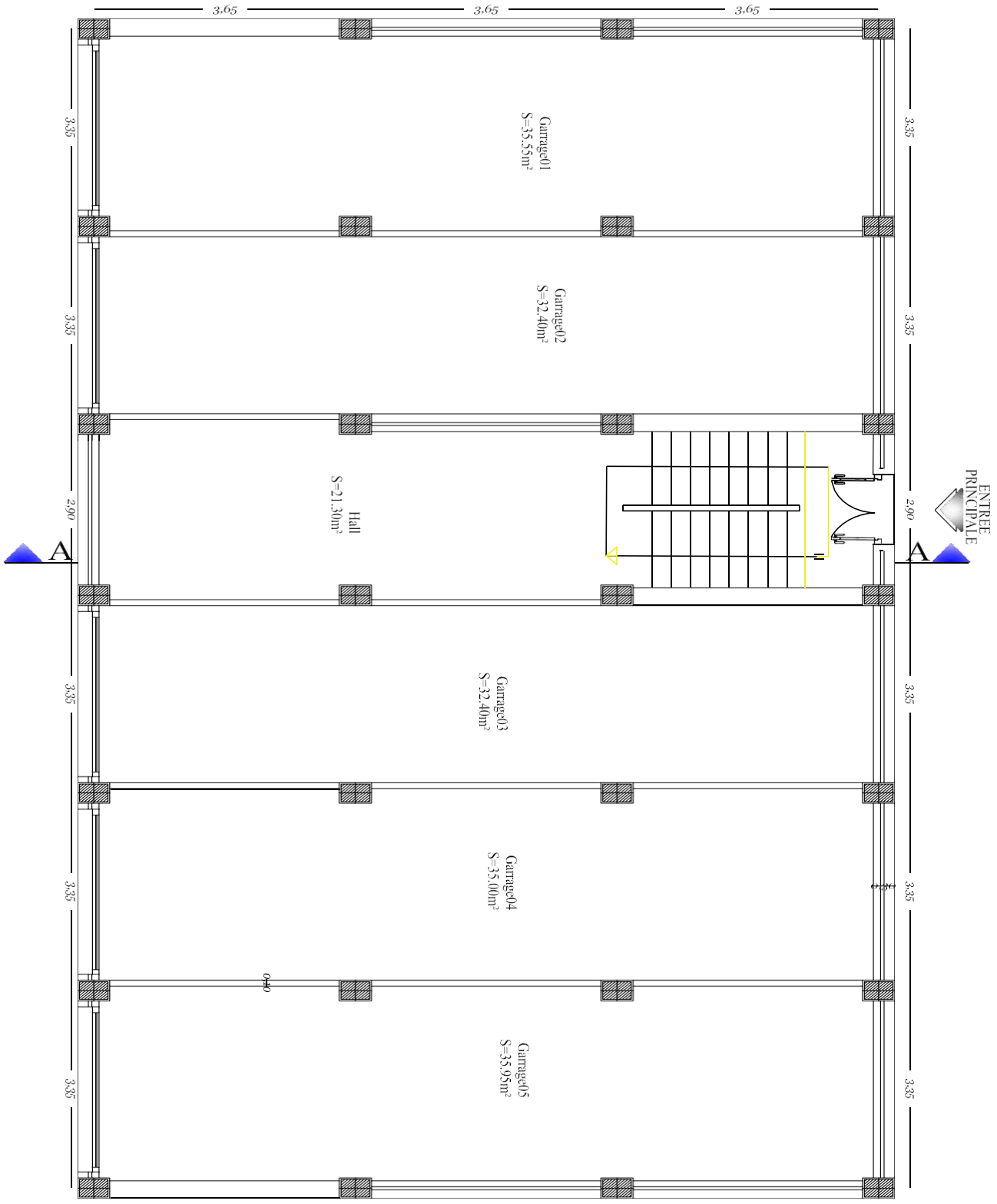


Figure II.01 : PLAN DU RDC

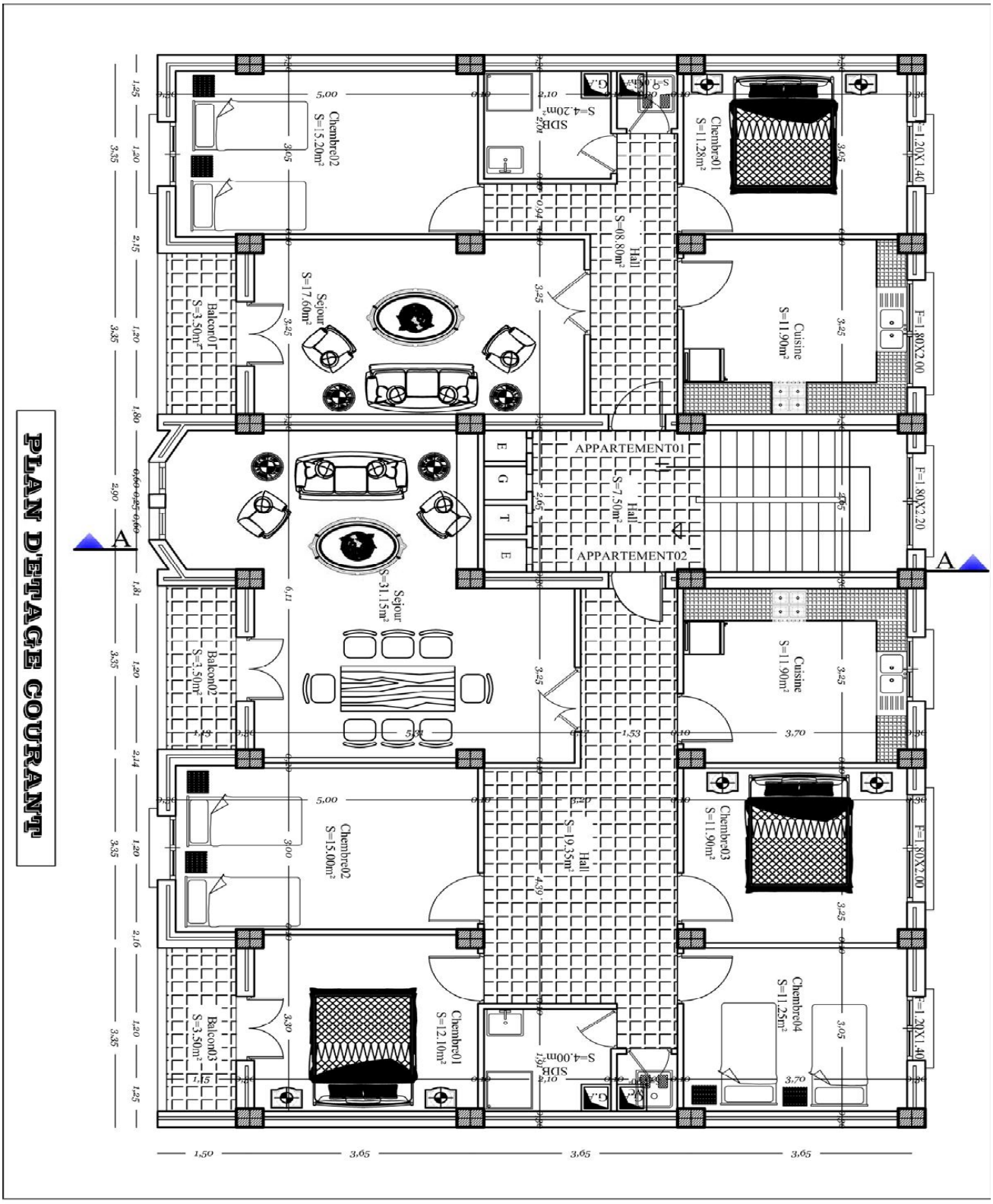


Figure II.02 : PLAN D'ETAGE COURANT

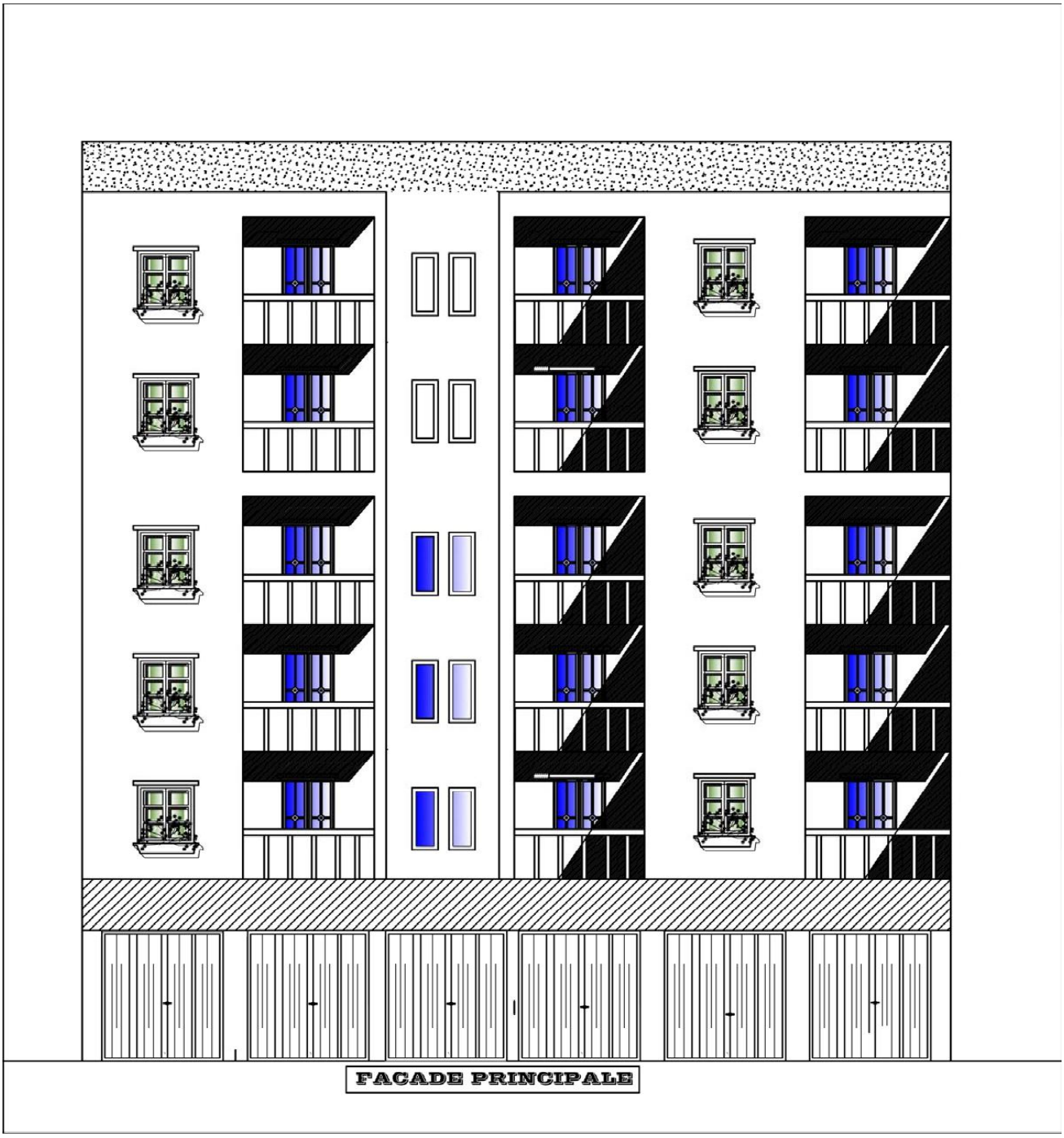


Figure II.03 : PLAN DE FACADE

II.2. Approche de modélisation

II.2.1. Logiciel utilisé

La modélisation tridimensionnelle de la structure a été réalisée à l'aide du logiciel ETABS (**Extended Three-Dimensional Analysis of Building Systems**), version 22.7.0 Ultimate.

ETABS est un logiciel de calcul et de conception des structures largement utilisé en génie civil, et plus particulièrement dans le domaine des bâtiments. Il est fondé sur la méthode des éléments finis, ce qui lui permet de modéliser de manière réaliste le comportement des structures soumises à différents types de sollicitations. Ce logiciel est spécialement conçu pour l'analyse des structures de bâtiments en béton armé, en acier ou en matériaux composites, en tenant compte des propriétés mécaniques des matériaux ainsi que des conditions réelles de chargement.

ETABS offre une plateforme intégrée permettant à la fois la modélisation géométrique des ouvrages et leur analyse statique et dynamique. Il permet notamment l'étude des effets sismiques, la détermination des déplacements, des efforts internes, ainsi que l'identification des modes propres de vibration. Grâce à ses outils de visualisation avancés, les résultats peuvent être représentés sous forme de tableaux détaillés ou de diagrammes graphiques, facilitant ainsi leur interprétation et leur exploitation dans le processus de conception et de vérification des structures.

Développé par la société Computers and Structures Inc (CSI), basée à Berkeley en Californie (États-Unis), le logiciel a été introduit pour la première fois en 1984. Depuis sa création, il a connu de nombreuses évolutions majeures, intégrant progressivement des méthodes d'analyse plus avancées ainsi que divers règlements de calcul internationaux, ce qui a renforcé son utilisation à l'échelle mondiale dans les projets de génie civil.

Les premières versions du logiciel étaient principalement basées sur les normes américaines telles que l'UBC (Uniform Building Code) et l'ACI (American Concrete Institute). Par la suite, **ETABS** a été enrichi par l'intégration de plusieurs normes internationales et de techniques de calcul plus performantes, notamment pour l'analyse dynamique et non linéaire des structures.

Dans le cadre de ce travail, la version **ETABS V22.4.0** a été utilisée. Cette version permet de réaliser des analyses avancées, notamment en régime non linéaire, et offre des capacités améliorées pour la modélisation et l'étude du comportement sismique des structures étudiées.[1]

II.2.2. Hypothèses de modélisation

Les hypothèses suivantes ont été adoptées pour la modélisation :

• Les planchers sont modélisés comme des diaphragmes rigides, assurant une répartition uniforme des efforts horizontaux entre les éléments porteurs verticaux.

• Les voiles de contreventement sont modélisés par des éléments coques (Shell) de type membrane-plaque.

• Les poteaux et les poutres sont modélisés par des éléments barres (Frame).

• Les appuis sont supposés encastrés au niveau de la base (RDC).

• Le calcul sismique est effectué conformément au RPA 99/2003, avec un coefficient sismique C = A×D×Q/R = 0.1438.

II.2.3. Paramètres sismiques RPA 99/2003

Paramètre	Valeur	Justification
Zone sismique	**III**	Tizi Ouzou
Coefficient A	**0.25**	Zone III
Facteur de qualité Q	**1.15**	Groupe 2
Coefficient R	**5**	Système mixte
Facteur dynamique D	**2.5**	Site S2
Coefficient C	**0.1438**	C = A×D×Q/R
Excentricité accidentelle	**5%**	RPA Art. 4.3.7

II.2.4. Manuel d'utilisation du logiciel ETABS

Les étapes de modélisation peuvent être résumées comme suit :

A) Introduction de la géométrie de l'ouvrage.

B) Spécification des propriétés mécaniques des matériaux.

C) Spécification des propriétés géométriques des éléments (poteaux, poutres, voiles…)

D) Définition des charges statiques (G, Q).

E) Définition de la charge sismique E.

F) Chargement des éléments.

G) Introduction des combinaisons d'actions.

H) Déroulement de l'analyse et visualisation des résultats.

Pour accéder à l'interface du logiciel, notre machine fonctionne sur un système d'exploitation « Windows 10 ». On clique sur l'icône exécutable représentée sur la figure suivante :

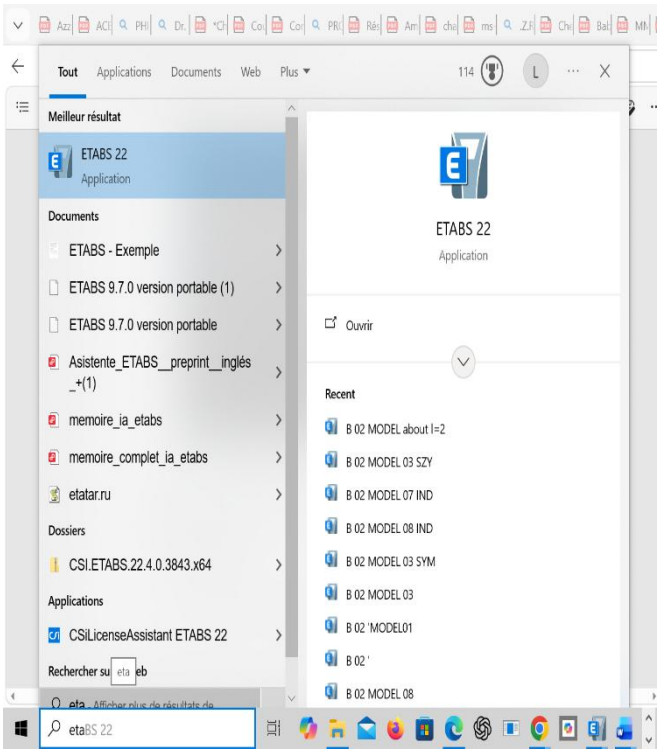


Figure 01 : Icône du logiciel ETABS sur système d'exploitation Windows 10.

II.3. Dispositions adoptées — Configurations étudiées

Dans le cadre de cette étude paramétrique, on a sept configurations de disposition des voiles de contreventement ont été modélisées sous ETABS.

II.3.1. Visualisation des configurations étudiées

Les figures suivantes présentent, pour chaque configuration, la disposition en plan des voiles de contreventement (en rouge) au niveau du RDC.

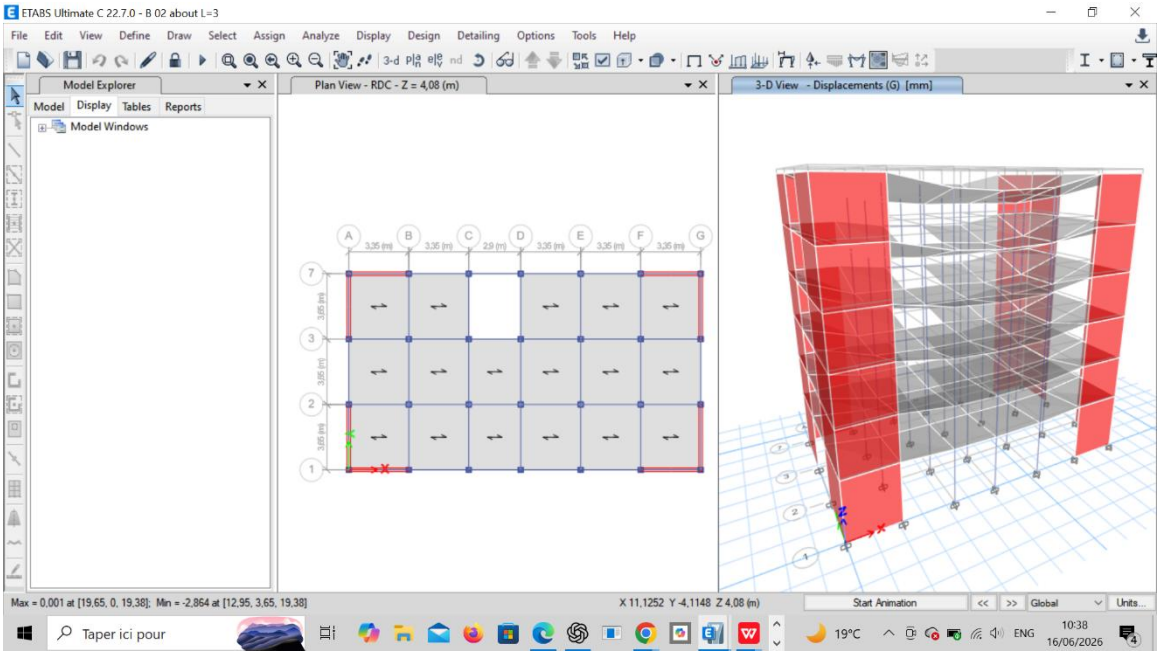


Figure II.04 : **DISPOSITION** 1*— Voiles périphériques continus en about.*

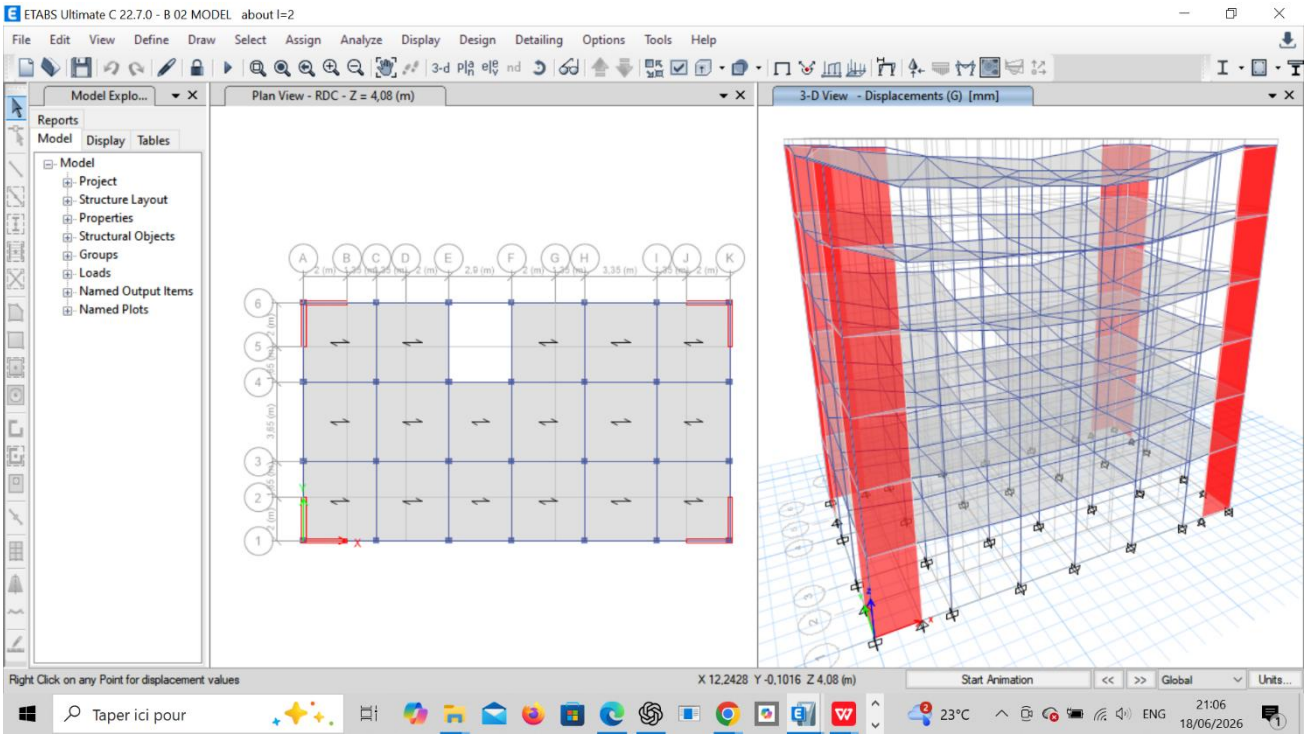


Figure II.05 : **DISPOSITION** 2*— Voiles en about L=2.*

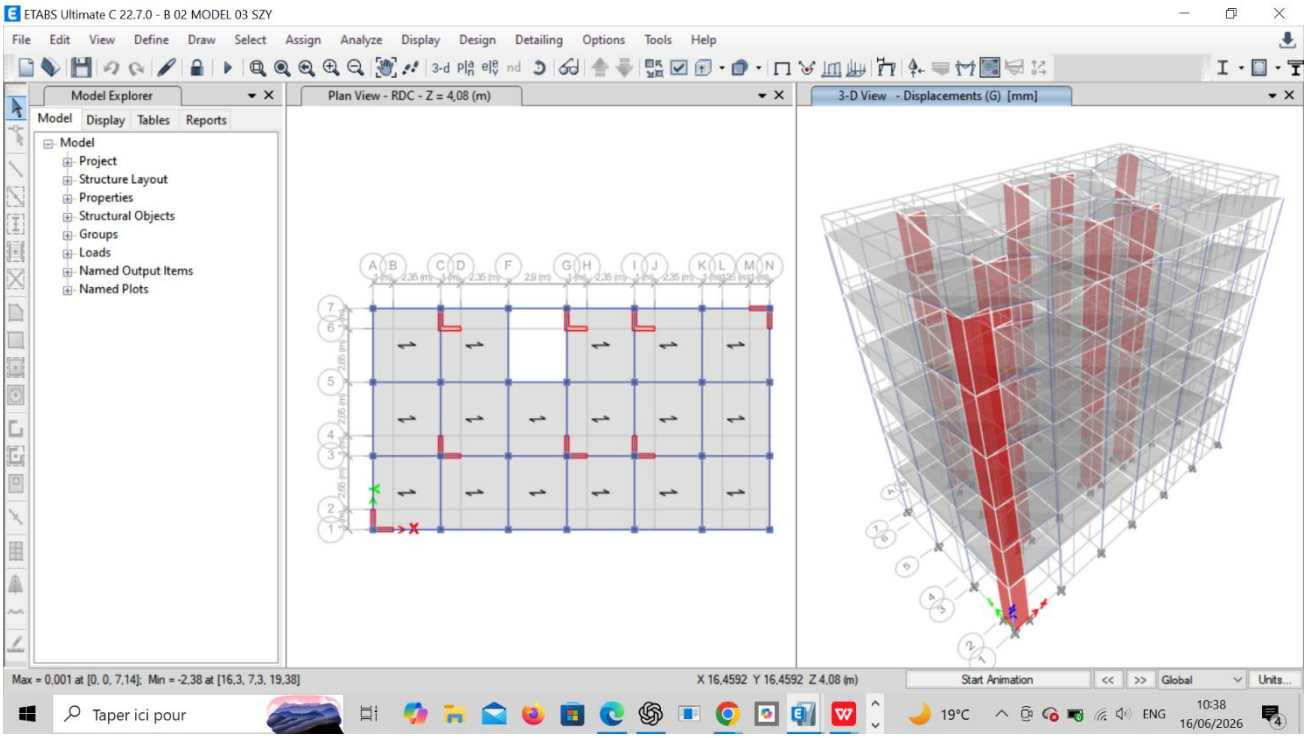


Figure II.06 : **DISPOSITION** 3*— Voiles en forme L.*

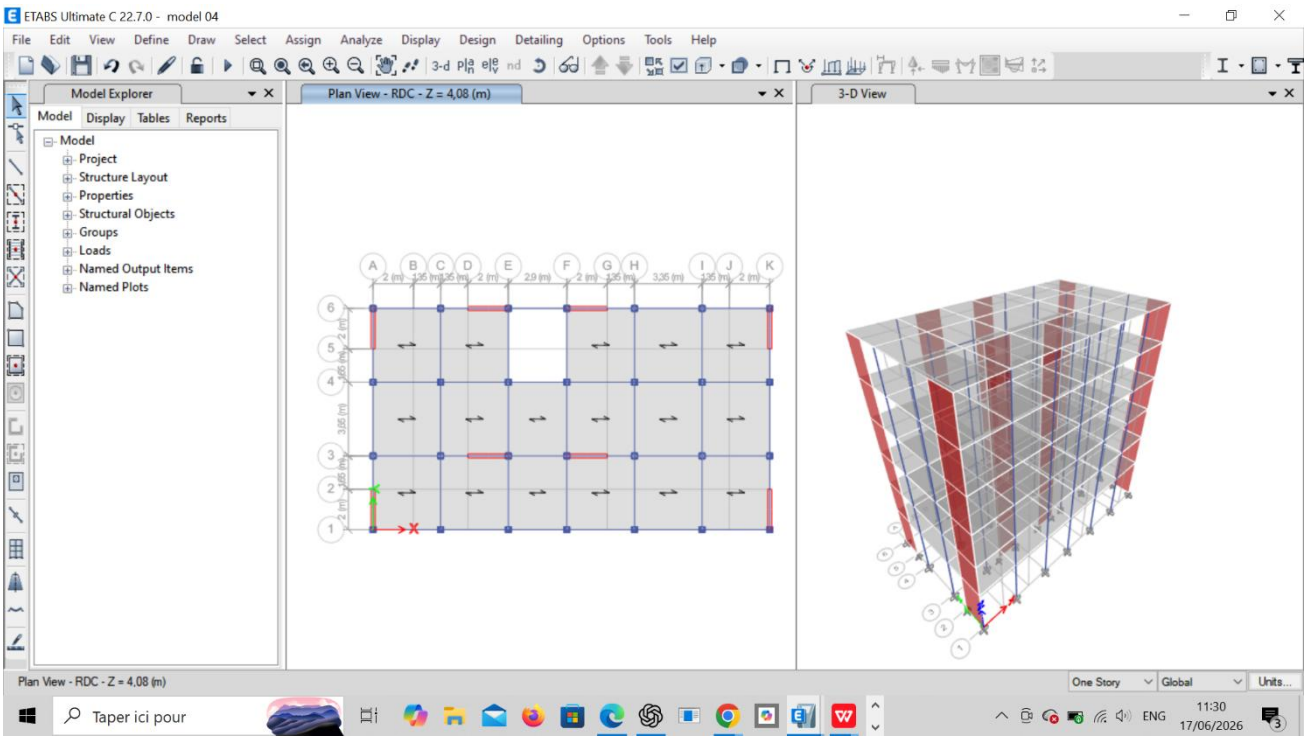


Figure II.07 : **DISPOSITION** 4*— Configuration 4 (excentricité non conforme)*

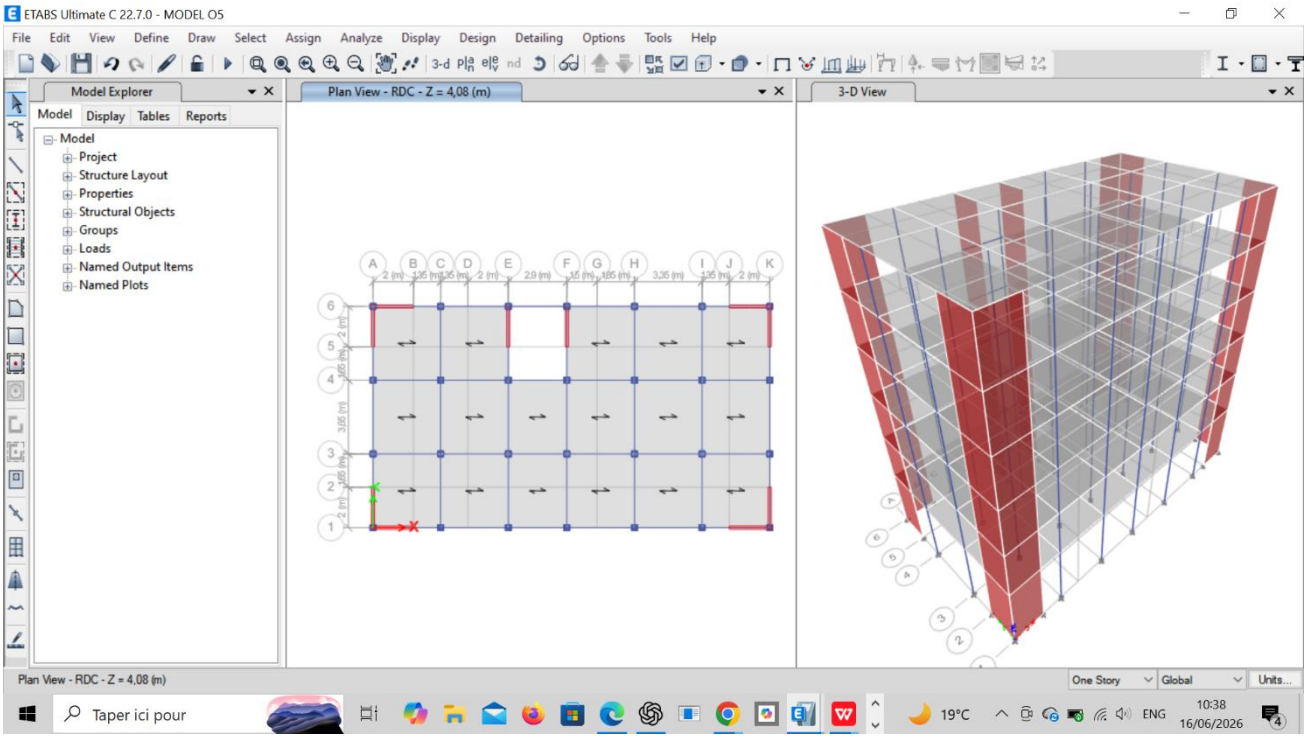


Figure II.08 : **DISPOSITION***5 — Configuration mixte (about + voiles centraux)*

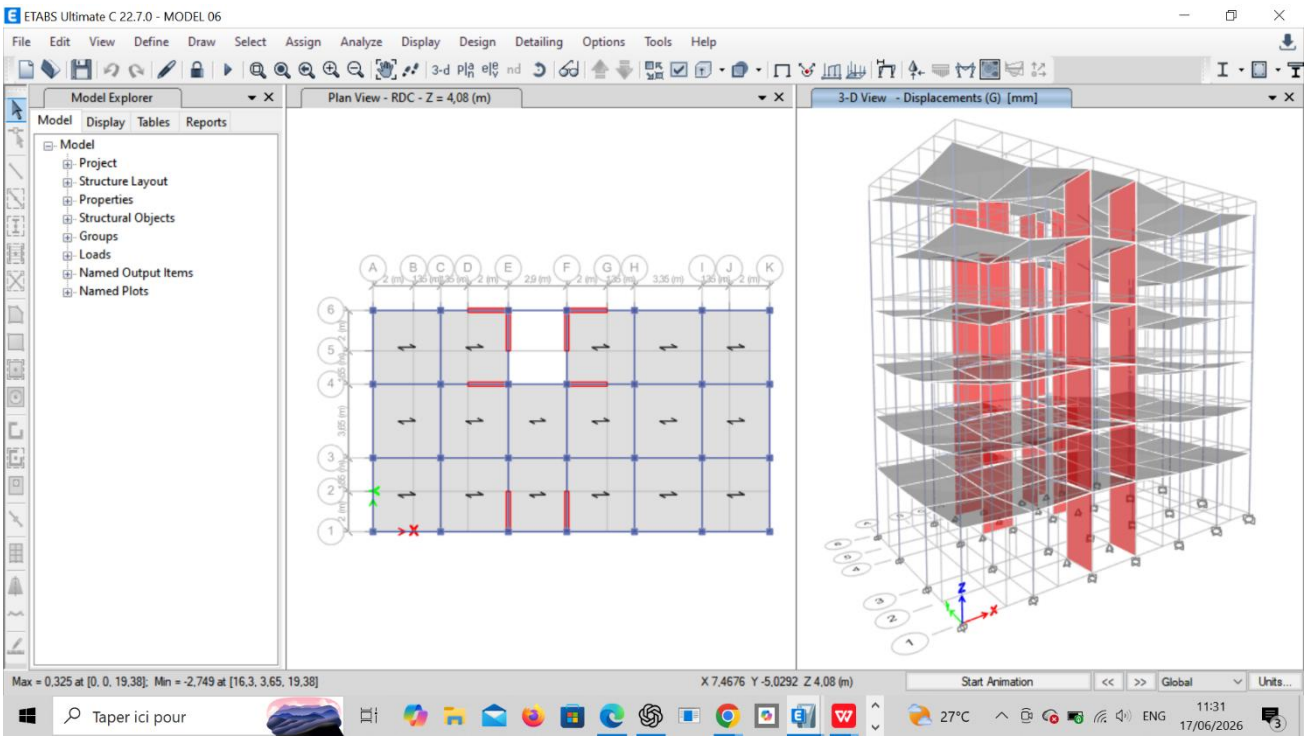


Figure II.09 : **DISPOSITION** 6 *— Configuration 6 (excentricité non conforme)*

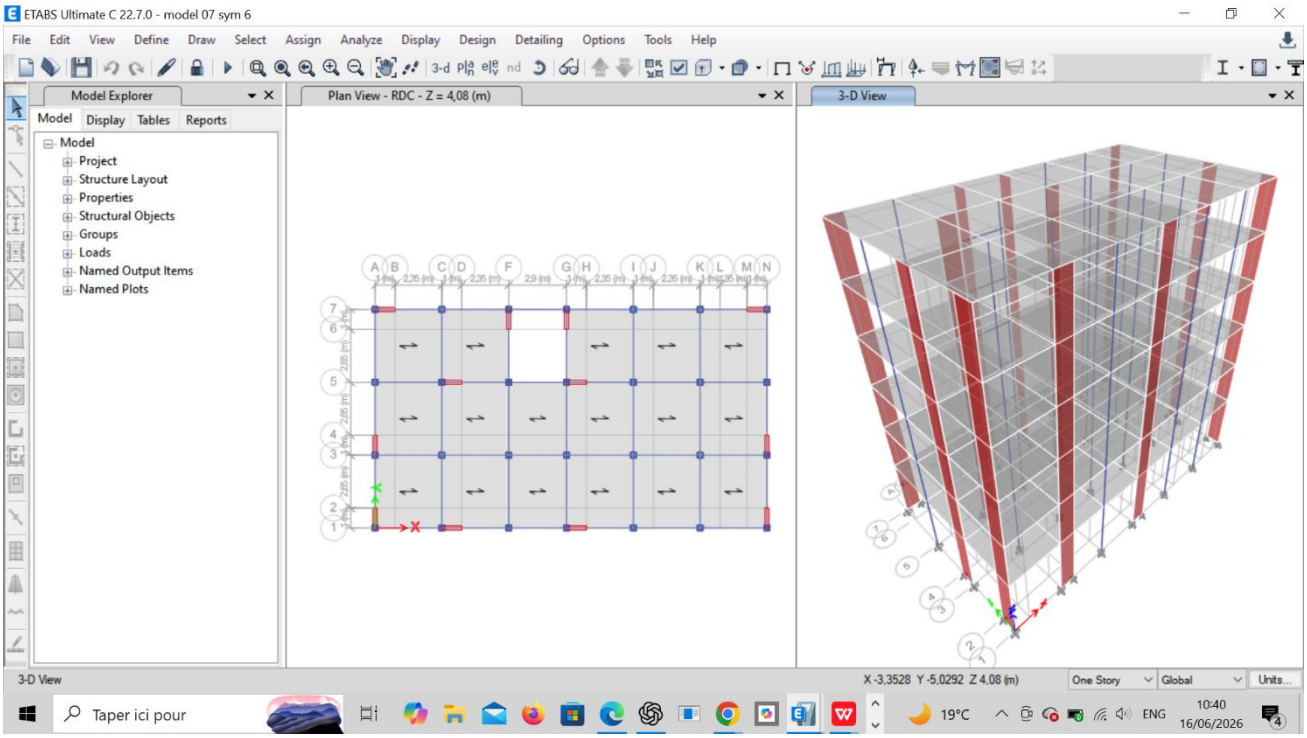


Figure II.10 : **DISPOSITION** 7*— Voiles répartis.*

DISPOSITION 1 — Voiles périphériques continus en about (L = 3,35m en x L=3,65m en y) : Cette configuration comporte des voiles de contreventement continus disposés sur l'ensemble du périmètre du bâtiment. Les voiles en about ont une longueur de 3 m et une épaisseur de 20 cm. Dans la direction X, les voiles longent les façades latérales sur toute la largeur (LY = 11,35 m), tandis que dans la direction Y, ils courent sur l'intégralité de la longueur (LX = 20,05 m). La longueur totale de voiles en X est de 11,35 m et en Y de 20,05 m. Cette disposition maximise la rigidité globale et minimise l'excentricité entre le centre de masse et le centre de rigidité, mais engendre un volume important de matériaux.

DISPOSITION 2 — Voiles en about simple (L = 2 m) : Dans cette configuration, quatre voiles en about de longueur L = 2 m et d'épaisseur 20 cm sont placés uniquement aux quatre coins du bâtiment, orientés parallèlement à la direction Y. Les voiles sont positionnés aux axes A et K en travure 1-2 (bas) et 5-6 (haut), conformément à l'espacement de travures lu dans ETABS (2 m + 1,95 m + 1,25 m + 2 m ... + 3,35 m). La longueur totale de voiles dans la direction Y est de 4 × 2 m = 8 m. Cette disposition est la plus économique en matériaux et présente un bon équilibre de contreventement dans les deux directions.

DISPOSITION 3 — Voiles en forme L (about double) : Cette configuration dispose des voiles en forme de L aux quatre coins du bâtiment, réalisant ainsi une connexion entre les voiles orthogonaux des directions X et Y. Chaque élément en L est composé d'un voile de 1 m dans la

direction X et d'un voile de 1 m dans la direction Y, d'épaisseur 20 cm, connectés à angle droit. Les axes impliqués sont A-B, C-D, G-H, I-J et les travures 1-2, 6-7.La connectivité entre voiles orthogonaux améliore l'intégration tridimensionnelle du contreventement, mais engendre un coût matériaux plus élevé qu'un about simple.

DISPOSITION 4 — Configuration mixte (about aux coins + voiles horizontaux intermédiaires) : Cette configuration associe des voiles en about de 2 m aux angles du bâtiment à des voiles horizontaux intermédiaires disposés à mi-hauteur du plan (travure 3). Les voiles verticaux sont orientés en Y aux axes A et K, et les voiles horizontaux en X aux travures 3 et 6. L'épaisseur est de 20 cm pour tous les éléments. Cette disposition engendre une excentricité très élevée entre le centre de masse et le centre de rigidité (ex/LX = 7,24 % et ey/LY = 29,47 %), très supérieure aux valeurs admissibles, ce qui entraîne son rejet de l'étude.

DISPOSITION 5 — Configuration mixte (abouts aux coins + voiles centraux) : Cette disposition combine des voiles en about simple de 2 m aux quatre coins (identiques à la DISPOSITION 2) avec des voiles centraux supplémentaires disposés dans la direction Y en position centrale (axe F-G). Les voiles centraux ont une longueur de 3,65 m et une épaisseur de 20 cm. L'espacement des travures est similaire à celui de la DISPOSITION 2 (2 m + 1,35 m + 0,25 m + 2 m ... + 3,35 m). La longueur totale de voiles est de 4 × 2 m + 2 × 3,65 m ≈ 15,3 m. Les voiles centraux induisent des moments fléchissants élevés (M = 261 kN.m) nécessitant un ferraillage plus important.

DISPOSITION 6 — Configuration à voiles intérieurs centrés : Cette configuration ne comporte pas de voiles en about sur les façades extérieures ; elle positionne uniquement des voiles verticaux en Y en position interne (axes E-F et G-H) et des voiles horizontaux en X à mi-plan (travure 4). Les voiles ont une épaisseur de 20 cm et une longueur d'environ 2 m chacun. Cette concentration des voiles en position centrale éloignée des façades génère une excentricité ey/LY = 14,49 % très supérieure à la valeur admissible, ce qui entraîne son élimination de l'étude paramétrique.

DISPOSITION 7 — Voiles en about simple répartis symétriquement (6 paires) : Cette dernière configuration généralise le principe de la DISPOSITION 2 en multipliant le nombre de voiles en about le long des façades. Six paires de voiles en about de longueur L = 2 m et d'épaisseur 20 cm sont réparties symétriquement dans la direction X (axes A-B, C-D, F, G-H, I-J, M-N) et dans la direction Y (travures 1, 3-4, 5-6). L'espacement régulier est de 1 m + 2,35 m répété. La longueur totale de voiles est d'environ 6 × 2 m = 12 m dans la direction principale. Cette répartition accroît la

flexibilité globale (T1 = 0,731 s) et engendre des moments de flexion importants (M = 427 kN.m) sur les voiles isolés.

II.4. Dispositions adoptées

Les sept configurations de voiles de contreventement étudiées dans ce travail ont été sélectionnées sur la base de trois critères principaux : la symétrie de la disposition par rapport au centre de masse du bâtiment, afin de limiter les effets de torsion ; la variété des typologies d'about (about simple, about en L, voiles continus, voiles centraux), permettant une comparaison paramétrique représentative ; et la conformité aux prescriptions constructives du RPA 99/2003 en matière d'épaisseur minimale et de longueur des voiles. Cette section présente, dans l'ordre, les périodes propres de vibration, la vérification de l'excentricité entre le centre de masse et le centre de rigidité, puis les taux de participation aux charges latérales et verticales pour les sept configurations étudiées.

II.4.1. Périodes propres de vibration

Le tableau ci-dessous présente les trois premières périodes propres de vibration obtenues par l'analyse modale sous ETABS pour chacune des sept configurations (**DISPOSITION** 1 à **DISPOSITION** 7).

MODEL	DISPOSITION 1	DISPOSITION 3	DISPOSITION 3	DISPOSITION 4	DISPOSITION 5	DISPOSITION 6	DISPOSITION 7
T1 (s)	**0.380**	**0.582**	**0.727**	**0.900**	**0.587**	**0.651**	**0.731**
T2 (s)	0.343	0.565	0.662	0.574	0.552	0.569	0.708
T3 (s)	0.208	0.368	0.621	0.483	0.383	0.453	0.569

On constate que la période fondamentale T1 varie de 0.380 s (DISPOSITION 1) à 0.900 s (DISPOSITION 4), traduisant des rigidités globales très différentes selon la disposition des voiles. Le modèle M1, avec des voiles périphériques continus, présente la rigidité la plus élevée, tandis que le modèle M4 correspond à la configuration la plus flexible. Parmi les configurations conformes (DISPOSITION 1, DISPOSITION 2, DISPOSITION 3, DISPOSITION 5, DISPOSITION 7), la période fondamentale varie de 0.380 s à 0.731 s, ce qui montre que la rigidité globale reste fortement dépendante de la disposition des voiles même au sein des modèles retenus.

II.4.2. Vérification de l'excentricité

La maîtrise de l'excentricité entre le centre de masse (CM) et le centre de rigidité (CR) constitue un objectif fondamental de la conception parasismique. En effet, le RPA 99/2003 n'impose pas de limite directe sur cette excentricité géométrique ; en revanche, il prescrit l'introduction d'une excentricité accidentelle de 5 % de la dimension en plan du bâtiment dans chaque direction, à appliquer lors des calculs afin de tenir compte des incertitudes sur la localisation des masses. La pratique courante de l'ingénierie parasismique recommande néanmoins de minimiser l'excentricité entre CM et CR, car un écart important favorise la torsion d'ensemble, ce qui dégrade la performance sismique de la structure et peut conduire à des contraintes excessives dans les éléments périphériques. Le tableau suivant présente les valeurs d'excentricité obtenues pour chaque configuration (DISPOSITION 1 à DISPOSITION 7), et identifie les modèles présentant un déséquilibre prononcé entre CM et CR.

Modèle	ex/LX (%)	ey/LY (%)	Appréciation	Statut
DISPOSITION1	0.27%	1.03%	Faible écart CM-CR	**Conforme**
DISPOSITION2	1.50%	4.81%	Écart acceptable	**Conforme**
DISPOSITION3	2.28%	3.00%	Écart acceptable	**Conforme**
DISPOSITION4	7.24%	29.47%	Écart très élevé	**Non conforme — REJETÉ**
DISPOSITION5	2.36%	0.95%	Faible écart CM-CR	**Conforme**
DISPOSITION6	0.24%	14.49%	Écart élevé	**Non conforme — REJETÉ**
DISPOSITION7	2.00%	3.64%	Écart acceptable	**Conforme**

Les résultats montrent que cinq configurations (**DISPOSITION**1,**DISPOSITION**2, **DISPOSITION**3, **DISPOSITION**5 et **DISPOSITION**7) respectent la condition d'excentricité dans les deux directions, avec des valeurs maximales ne dépassant pas 4.81% (**DISPOSITION**2, direction Y). Les modèles M4 (ey/LY = 29.47%) et **DISPOSITION**6 (ey/LY = 14.49%) présentent une excentricité largement supérieure à la limite de 5% et sont par conséquent écartés de la suite de l'étude. Les cinq configurations conformes (**DISPOSITION**1, **DISPOSITION**2, **DISPOSITION**3, **DISPOSITION**5, **DISPOSITION**7) seront analysées dans la suite de ce chapitre et dans le Chapitre III.

II.4.3. Taux de participation aux charges latérales

Le tableau suivant présente, pour chacune des cinq configurations adoptées (**DISPOSITION** 1, **DISPOSITION** 2, **DISPOSITION** 3, **DISPOSITION** 5, **DISPOSITION** 7), les taux de participation des voiles et des portiques à la reprise de l'effort tranchant sismique dans les directions X et Y. Conformément au RPA 99/2003, les voiles ne doivent pas reprendre plus de 75% de l'effort tranchant d'étage, les portiques devant assurer au moins 25%.

Modèle	% Voiles EX	% Portiques EX	% Voiles EY	% Portiques EY
DISPOSITION 1	**71.5%**	28.5%	**68.2%**	31.8%
DISPOSITION 2	**73.6%**	26.4%	**70%**	30.0%
DISPOSITION 3	**68.4%**	31.6%	**65.1%**	34.9%
DISPOSITION 5	**72.3%**	27.7%	**69.5%**	30.5%
DISPOSITION 7	**72.9%**	27.1%	**65.4%**	34.6%

Pour l'ensemble des cinq configurations conformes, les voiles assurent entre 68.4% et 73.6% de l'effort tranchant dans les deux directions, tandis que les portiques en reprennent entre 26.4% et 31.6%. Ces résultats respectent la condition réglementaire imposant une participation des voiles inférieure ou égale à 75% et une participation des portiques supérieure ou égale à 25%, dans les deux directions principales (X et Y).

II.4.4. Taux de participation aux charges verticales

Le tableau suivant présente le taux de participation des voiles et des portiques à la reprise des charges verticales, pour chacune des cinq configurations conformes. Conformément au RPA 99/2003, les voiles doivent reprendre au moins 20% des charges verticales, les portiques n'excédant pas 80%.

Modèle	% Voiles	% Portiques	Condition RPA	Statut
DISPOSITION 1	**38.6%**	61.4%	Voiles≥20% / Portiques≤80%	✅ **OK**
DISPOSITION 2	**24.6%**	75.4%	Voiles≥20% / Portiques≤80%	✅ **OK**
DISPOSITION 3	**40.7%**	59.3%	Voiles≥20% / Portiques≤80%	✅ **OK**
DISPOSITION 5	**29%**	71%	Voiles≥20% / Portiques≤80%	✅ **OK**
DISPOSITION 7	**33.4%**	66.6%	Voiles≥20% / Portiques≤80%	✅ **OK**

L'ensemble des cinq configurations conformes satisfait la condition de participation aux charges verticales, avec une part des voiles comprise entre 24.6% (**DISPOSITION** 2) et 40.7% (**DISPOSITION** 3), et une part complémentaire des portiques comprise entre 59.3% et 75.4%, respectant ainsi les limites réglementaires de 20% (voiles, minimum) et 80% (portiques, maximum).

Chapitre III : RESULTATS ET DUSCUSSION

INTRODUCTION

Ce chapitre constitue le cœur de notre travail. Il est organisé en deux parties complémentaires : le calcul des sections d'armature des éléments structuraux (poteaux et voiles) pour chacune des cinq configurations conformes, puis une étude paramétrique comparative permettant d'analyser l'influence de la position, du type d'about et de l'interaction des voiles selon les directions X et Y, en vue d'identifier la configuration de contreventement mixte la plus performante.

III.1. Calcul des sections des éléments structuraux

Le dimensionnement des armatures est effectué à partir des efforts internes maximaux extraits du logiciel ETABS au niveau de la base (RDC), toutes combinaisons confondues. Les calculs sont menés conformément au BAEL 91 révisé 99 et aux prescriptions du RPA 99/2003.

III.1.1. Hypothèses de calcul

Les hypothèses retenues pour le dimensionnement sont les suivantes :

- Béton : $f_{c28} = 25$ MPa, $\gamma_c = 1.5 \rightarrow f_{cd} = 16.67$ MPa.
- Acier FeE400: $f_e = 400$ MPa, $\gamma_s = 1.15 \rightarrow f_{yd} = 347.83$ MPa.
- Voiles : épaisseur = 20 cm, calcul par mètre linéaire → b = 100 cm.
- Efforts retenus : valeurs maximales en valeur absolue au niveau de la base, toutes combinaisons confondues (ELU, ELS, ELA).

III.1.2. Efforts internes maximaux (N, V, M)

Le tableau suivant présente les efforts internes maximaux extraits d'ETABS pour les poteaux et les voiles de chaque configuration conforme.

Modèle	Élément	N (kN)	V (kN)	M (kN.m)	Section	
DISPOSITION1	Voiles	1831.93	5.833	20.863	ép. 20 cm	
DISPOSITION1	Poteaux	1238.28	4.837	3.080	40×40 cm	
DISPOSITION2	Voiles	770.95	0.258	36.868	ép. 20 cm	
DISPOSITION2	Poteaux	1250.40	4.845	3.626	40×40 cm	
DISPOSITION3	Voiles	922.07	0.441	23.454	ép. 20 cm	
DISPOSITION3	Poteaux	1051.31	4.207	3.625	40×40 cm	
DISPOSITION5	Voiles	125.56	0.561	261.010	ép. 20 cm	
DISPOSITION5	Poteaux	1245.04	5.115	3.531	40×40 cm	
DISPOSITION7	Voiles	56.27	48.968	426.735	ép. 20 cm	
DISPOSITION7	Poteaux	1199.64	4.830	4.558	40×40 cm	

On observe que les efforts normaux N sont nettement plus importants dans les poteaux (entre 1 051 kN et 1 250 kN) que dans les voiles des configurations DISPOSITION 5 et DISPOSITION 7 (56 à 126 kN). Ces derniers sont principalement sollicités en flexion, avec des moments fléchissants élevés (261 kN.m pour DISPOSITION 5 et 427 kN.m pour DISPOSITION7). Les configurations DISPOSITION1, DISPOSITION2 et DISPOSITION3 présentent des voiles fortement sollicités en effort normal (jusqu'à 1 832 kN pour DISPOSITION1), traduisant leur rôle prépondérant dans la reprise des charges verticales.

III.1.3. Résultats du calcul des armatures

La section d'armature est calculée par la méthode de la flexion simple ($\mu = M / b \cdot d^2 \cdot fcd$). La section finale retenue est le maximum entre la valeur calculée et la section minimale réglementaire selon le RPA 99/2003 (As_min = 0.8%×b×h pour les poteaux, 0.13%×b×h×2 pour les voiles).

Modèle	Élément	μ	As_M (cm²)	As_min (cm²)	As_finale (cm²)	Ferraillage
DISPOSITION1	Voiles	0.0489	3.85	26.00	**26.00**	8HA10/face e=15cm
DISPOSITION1	Poteaux	0.0036	0.25	23.40	**23.40**	8HA20 (As=25.13cm²)
DISPOSITION2	Voiles	0.0864	6.94	26.00	**26.00**	8HA12/face e=15cm
DISPOSITION2	Poteaux	0.0042	0.29	23.40	**23.40**	8HA20 (As=25.13cm²)
DISPOSITION3	Voiles	0.0550	4.34	26.00	**26.00**	8HA12/face e=15cm
DISPOSITION3	Poteaux	0.0042	0.29	23.40	**23.40**	8HA20 (As=25.13cm²)
DISPOSITION5	Voiles	0.6117	52.11	26.00	**52.11**	10HA12/face e=12cm
DISPOSITION5	Poteaux	0.0041	0.28	23.40	**23.40**	8HA20 (As=25.13cm²)
DISPOSITION7	Voiles	1.0002	85.20	26.00	**85.20**	12HA14/face e=10cm
DISPOSITION7	Poteaux	0.0053	0.36	23.40	**23.40**	8HA20 (As=25.13cm²)

Pour l'ensemble des poteaux, la section d'armature est gouvernée par la condition minimale réglementaire (As_min = 23.40 cm²), les moments fléchissants étant très faibles. Le ferraillage adopté est de 8HA20 (As = 25.13 cm²) pour toutes les configurations. Pour les voiles, les sections varient significativement : les modèles DISPOSITION1, DISPOSITION2 et DISPOSITION3 sont régis par

l'armature minimale (26.00 cm²), tandis que DISPOSITION5 et DISPOSITION7 nécessitent des armatures plus importantes (52.11 et 85.20 cm²) en raison des moments fléchissants élevés induits par leur configuration. Ces sections d'armature permettent de calculer les quantités totales de matériaux (volume de béton et masse d'acier) pour chaque configuration, lesquelles serviront de critère principal d'optimisation dans la section III.3

III.2. Étude paramétrique et analyse comparative

L'étude paramétrique vise à analyser l'influence de trois paramètres sur le comportement et le coût du système de contreventement : le positionnement des voiles par rapport au centre de masse du bâtiment, le type d'about (simple ou en L — connectivité des voiles orthogonaux dans les directions X et Y), et la répartition symétrique des voiles en plan. Le critère de comparaison entre les différentes variantes est le coût global des matériaux, évalué par le volume de béton (m³) et la masse d'acier (kg) des voiles.

III.2.1. Influence de la position des voiles sur la rigidité (T1)

La période fondamentale T1 est le principal indicateur de la rigidité globale d'une structure : plus T1 est faible, plus la structure est rigide et mieux elle résiste aux sollicitations sismiques. La figure suivante illustre la variation de T1 pour les cinq configurations étudiées.

Figure III.1 : Périodes fondamentales T1 des configurations conformes

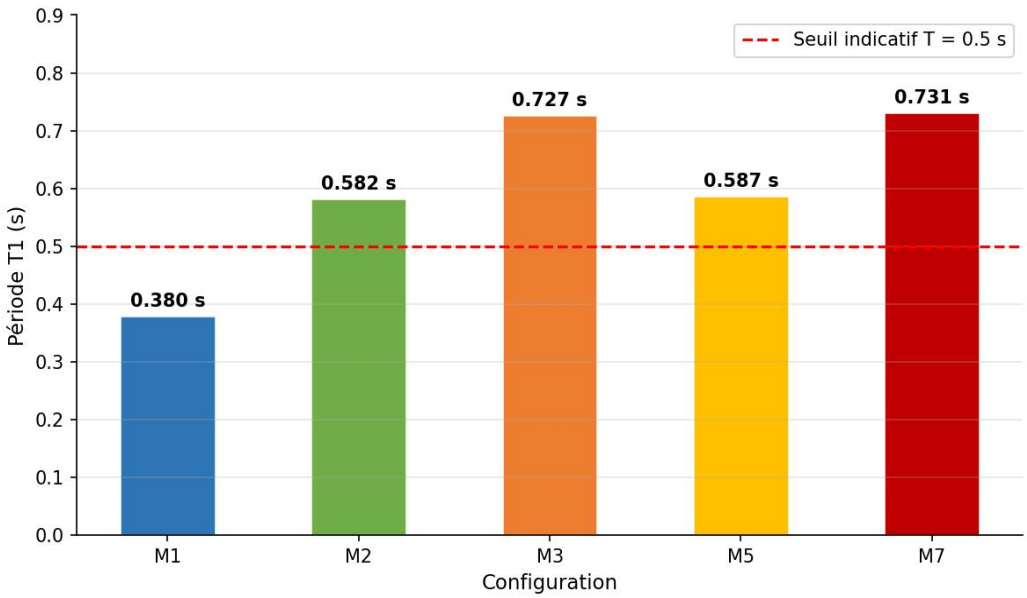


Figure III.1 : Périodes fondamentales T1 des cinq configurations conformes

La figure révèle une variation significative de T1 entre les configurations, allant de 0.380 s (M1) à 0.731 s (M7), soit une variation de 92%. La configuration M1, avec ses voiles périphériques continus sur l'ensemble du contour de la structure, offre la rigidité maximale. Les configurations M2 et M5, avec des périodes proches (0.582 s et 0.587 s respectivement), présentent un comportement dynamique similaire malgré des dispositions différentes. Les configurations M3 et M7 sont les plus flexibles, avec des périodes supérieures à 0.72s. Ces résultats confirment que la concentration des voiles sur le

périmètre extérieur de la structure maximise la rigidité latérale, tandis qu'une répartition plus centrée ou dispersée des voiles conduit à une plus grande flexibilité globale.

La comparaison entre les dispositions D1, D2 et D3, qui correspondent à des voiles de plus en plus proches du centre de masse, met en évidence un effet inverse sur le coût global des matériaux : plus les voiles se rapprochent du centre de masse (D1 → voiles périphériques, D2 → abouts aux coins, D3 → abouts en L), plus leur volume de béton diminue (280,46 m³ pour D1 contre 89,32 m³ pour D2 et 119,69 m³ pour D3). Cependant, ce rapprochement vers le centre induit une perte de rigidité (T1 augmente de 0,380 s à 0,582 s puis 0,727 s) et une augmentation des moments fléchissants dans les voiles. La DISPOSITION 2 représente ainsi le meilleur compromis entre rigidité satisfaisante et coût minimal.

III.2.2. Influence du type d'about sur l'équilibre bidirectionnel

L'équilibre du contreventement dans les deux directions X et Y est évalué par le taux de participation des voiles à la reprise de l'effort tranchant sismique. Conformément au RPA 99/2003, ce taux doit être inférieur ou égal à 75% (les portiques devant reprendre au moins 25%). La figure ci-dessous présente les taux de participation des voiles dans les directions X et Y pour chaque configuration.

Figure III.2 : Taux de participation des voiles aux charges latérales (EX et EY)

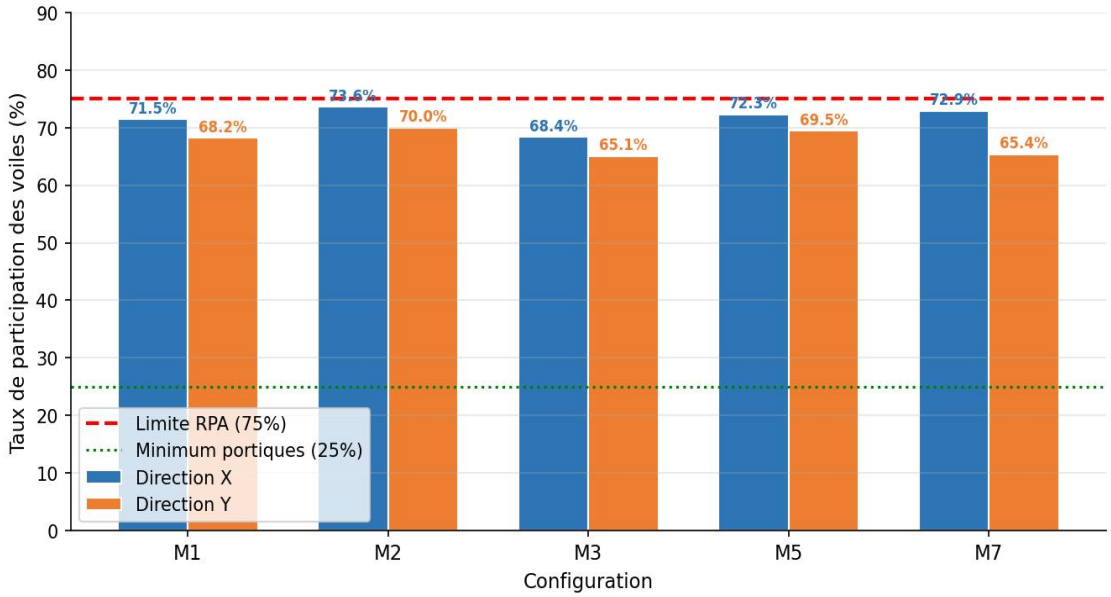


Figure III.2 : Taux de participation des voiles aux charges latérales selon EX et EY

Modèle	% Voiles EX	% Portiques EX	% Voiles EY	% Portiques EY	RPA (≤75%)
M1	**71.5%**	28.5%	**68.2%**	31.8%	✓ **OK**

Modèle	% Voiles EX	% Portiques EX	% Voiles EY	% Portiques EY	RPA (≤75%)
M2	**73.6%**	26.4%	**70%**	30.0%	✓ **OK**
M3	**68.4%**	31.6%	**65.1%**	34.9%	✓ **OK**
M5	**72.3%**	27.7%	**69.5%**	30.5%	✓ **OK**
M7	**72.9%**	27.1%	**65.4%**	34.6%	✓ **OK**

Toutes les configurations respectent la condition réglementaire (voiles ≤ 75%, portiques ≥ 25%) dans les deux directions. On constate cependant des écarts entre les directions X et Y, notamment pour la configuration M3 (écart de 3.3 points) et M5 (écart de 2.8 points). La configuration M7 présente l'écart le plus faible (7.5 points), traduisant un meilleur équilibre bidirectionnel, ce qui est favorable pour un comportement sismique équilibré. La configuration M2 présente également un bon équilibre (écart de 3.6 points). Sur le plan du coût global des matériaux, la comparaison entre les dispositions à about simple (DISPOSITION 2 : 89,32 m³ de béton et 9 115 kg d'acier ; DISPOSITION 7 : 77,71 m³ et 25 987 kg) et la disposition à about en L — about double — (DISPOSITION 3 : 119,69 m³ et 12 215 kg) montre que la connectivité entre voiles orthogonaux (about double) engendre un surcoût en béton de l'ordre de 34 % par rapport à l'about simple de DISPOSITION 2, sans apport proportionnel en rigidité. La DISPOSITION 1, qui constitue le cas extrême avec des voiles périphériques continus sur toute la façade, présente le coût le plus élevé (280,46 m³ et 28 621 kg), confirmant que la concentration des voiles en périphérie n'est pas économiquement justifiée pour ce type de bâtiment.

III.2.3. Impact sur les volumes de matériaux et le coût

L'évaluation économique est réalisée à partir des volumes de béton et des masses d'acier des voiles, calculés sur la hauteur totale du bâtiment (H = 22.33 m) avec une épaisseur constante de 20 cm. L'influence de la connectivité entre voiles orthogonaux est également analysée : les dispositions à about en L (DISPOSITION 3), qui relient les voiles des directions X et Y à angle droit, engendrent un volume de béton supérieur de 34 % par rapport à l'about simple (DISPOSITION 2 : 89,32 m³ contre 119,69 m³), en raison de la longueur totale de voiles plus importante. Cette connectivité améliore l'intégration tridimensionnelle du contreventement mais se traduit par un surcoût matériaux non négligeable.

Formules utilisées:

- *Volume béton : V_béton = L_totale × 0.20 × 22.33 (m³)*
- *Masse acier : M_acier = As (m²) × L_totale × 22.33 × 7850 (kg)*

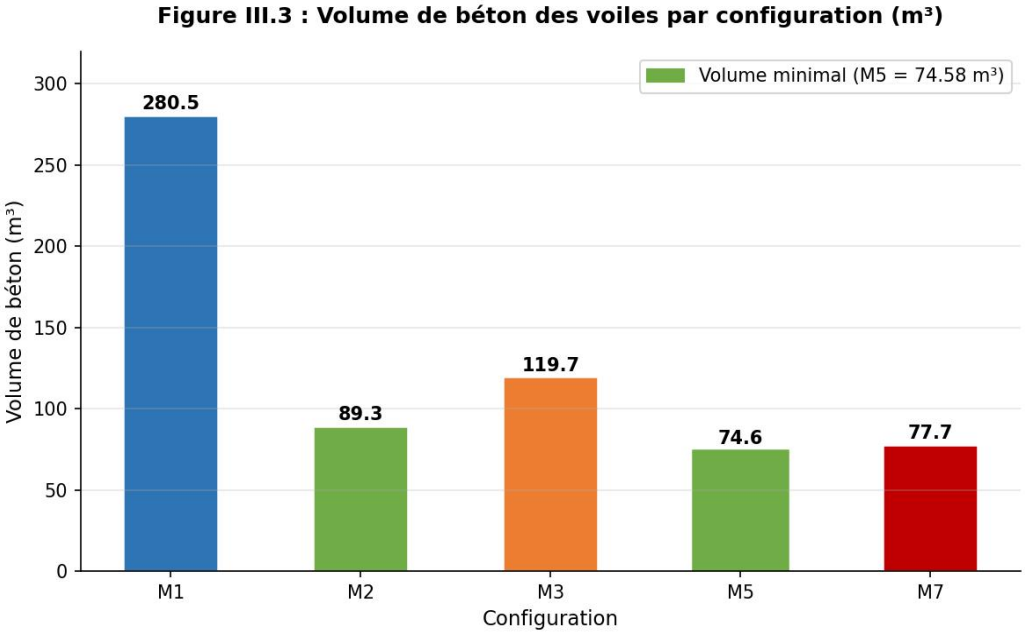


Figure III.3 : Volume de béton des voiles par configuration (m³)

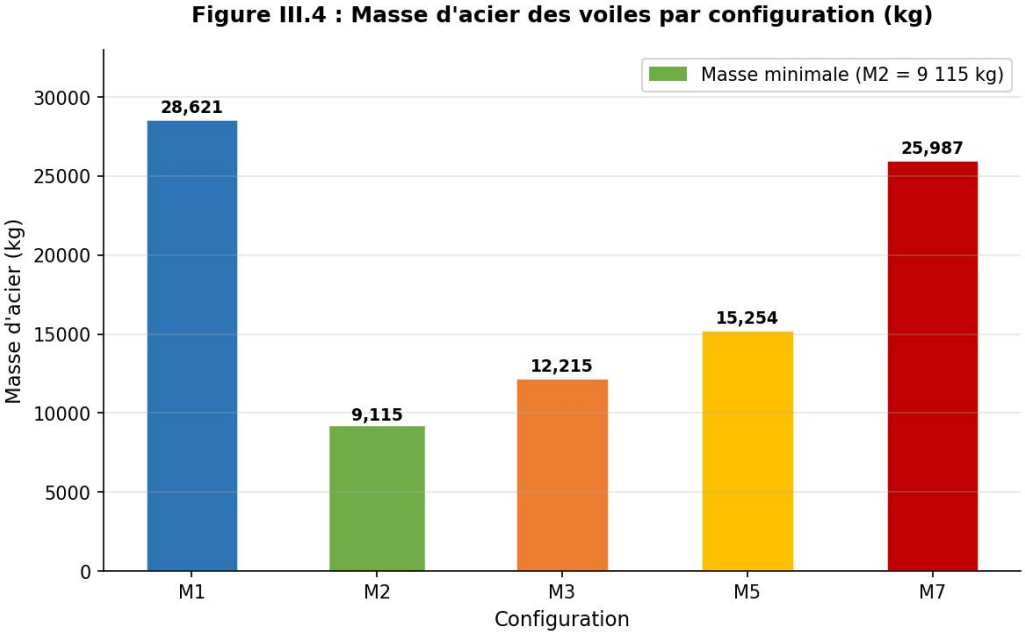


Figure III.4 : Masse d'acier des voiles par configuration (kg)

Modèle	Configuration	L voiles (m)	V béton (m³)	Masse acier (kg)	
M1	Voiles périphériques continus	62.80 m	280.46	28,621 kg	

Modèle	Configuration	L voiles (m)	V béton (m³)	Masse acier (kg)	
M2	Voiles en about L=2	20.00 m	89.32	**9,115 kg**	
M3	Voiles en forme L	26.80 m	119.69	12,215 kg	
M5	Configuration mixte (about+centre)	16.70 m	**74.58**	15,254 kg	
M7	Voiles répartis, about L=2 étendu	17.40 m	77.71	25,987 kg	

La configuration M1, avec ses voiles périphériques continus, est de loin la plus consommatrice en matériaux : 280.46 m³ de béton et 28 621 kg d'acier. À l'opposé, les configurations M5 et M7, avec des longueurs totales de voiles nettement inférieures, présentent les volumes de béton les plus faibles (74.58 m³ et 77.71 m³). Cependant, en raison des sections d'armature importantes requises pour leurs voiles (As = 52.11 et 85.20 cm²), la masse d'acier de M7 reste élevée (25 987 kg), proche de celle de M1. La configuration M2 présente le meilleur équilibre économique, avec un volume de béton de 89.32 m³ et la masse d'acier la plus faible (9 115 kg).

III.3. Optimisation basée sur le coût global des matériaux

Le critère d'optimisation retenu dans cette étude est le coût global des matériaux des voiles de contreventement, évalué à travers deux indicateurs complémentaires : le volume de béton (m³) et la masse d'acier (kg). Ces deux quantités sont calculées pour l'ensemble des voiles de chaque configuration, en tenant compte des dimensions géométriques (épaisseur, longueur, hauteur) et des sections d'armature déterminées au Chapitre III.1. Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour les cinq configurations conformes.

Tableau III.6 : Coût matériaux des voiles — Volume de béton et masse d'acier

Configuration	Volume béton voiles (m³)	Masse acier voiles (kg)	Classement
DISPOSITION 1	280.46	28 621	5ème — le plus coûteux
DISPOSITION 2	89.32	9 115	**1ère — OPTIMALE ✓**
DISPOSITION 3	119.69	12 215	2ème
DISPOSITION 5	74.58	15 254	3ème
DISPOSITION 7	77.71	25 987	4ème

L'analyse du coût global des matériaux met en évidence des écarts significatifs entre les configurations. La DISPOSITION 1 (voiles périphériques continus) présente le coût le plus élevé, avec un volume de béton de 280,46 m³ et une masse d'acier de 28 621 kg, en raison de la quantité importante de voiles déployés sur toute la périphérie du bâtiment. À l'opposé, la DISPOSITION 2 (voiles en about, L = 2 m) se distingue comme la solution la plus économique : avec seulement 89,32

m³ de béton et 9 115 kg d'acier, elle réalise une économie de l'ordre de 68 % sur le volume de béton et de 68 % sur la masse d'acier par rapport à la DISPOSITION 1, tout en maintenant une rigidité satisfaisante (T1 = 0,582 s) et une participation aux charges conformes au RPA 99/2003.

En ce qui concerne l'influence de la position des voiles, les configurations en about (DISPOSITION 2 et DISPOSITION 3) s'avèrent nettement plus économiques que la solution périphérique continue (DISPOSITION 1). L'about simple (DISPOSITION 2) reste plus économique que l'about en L (DISPOSITION 3) : 89,32 m³ contre 119,69 m³ de béton, soit une différence de 25 %. Ce résultat montre que la connexion entre voiles orthogonaux, bien qu'elle améliore l'intégration tridimensionnelle du contreventement, engendre un sur-coût matériaux non négligeable sans apport proportionnel en termes de rigidité. Quant aux DISPOSITIONS 5 et 7 (voiles centraux ou répartis), si leur volume de béton est faible, leur masse d'acier reste élevée en raison des moments fléchissants importants induits, ce qui dégrade leur bilan économique global.

Sur la base de cette optimisation par le coût global, la DISPOSITION 2 — voiles en about de longueur L = 2 m — est retenue comme la configuration optimale. Elle combine le coût matériaux le plus faible (béton : 89,32 m³ ; acier : 9 115 kg), une rigidité dynamique satisfaisante (T1 = 0,582 s), un excellent équilibre du contreventement dans les deux directions (ex/LX = 1,50 %, ey/LY = 4,81 %) et une conformité totale aux exigences du RPA 99/2003.

Conclusion Générale

Le présent mémoire avait pour objectif principal de réaliser une étude comparative et paramétrique de plusieurs configurations de contreventement mixte portiques-voiles dans un bâtiment en béton armé de type R+5, implanté en zone sismique III selon le Règlement Parasismique Algérien RPA 99/2003. Cette démarche visait à identifier la disposition des voiles la plus performante, en conciliant exigences sismiques, équilibre directionnel et économie de matériaux.

Le premier chapitre a posé les fondements théoriques indispensables à la compréhension de l'étude : définition et rôle des systèmes de contreventement, comportement spécifique du système mixte portiques-voiles, et revue de la littérature scientifique internationale portant sur l'optimisation de la disposition des voiles de cisaillement. Cette synthèse bibliographique a mis en évidence l'importance de la position, de la géométrie et du ratio surface des voiles/surface des planchers sur la réponse dynamique des structures.

Le deuxième chapitre a présenté l'ouvrage étudié, la démarche de modélisation adoptée sous le logiciel ETABS, et les sept configurations de contreventement mixte analysées. L'évaluation préliminaire a permis d'éliminer deux configurations (DISPOSITION 4 et DISPOSITION 6) en raison d'une excentricité largement supérieure à la limite réglementaire de 5 % imposée par le RPA 99/2003. Les cinq configurations restantes — DISPOSITION 1, 2, 3, 5 et 7 — ont satisfait les conditions d'excentricité, de participation aux charges latérales et de participation aux charges verticales, et ont été retenues pour l'étude paramétrique approfondie.

Le troisième chapitre a constitué le cœur de cette recherche. Le dimensionnement des armatures a montré que les configurations DISPOSITION 1, 2 et 3 sont régies par les sections minimales réglementaires pour les voiles (As = 26,00 cm²), tandis que les configurations DISPOSITION 5 et 7, soumises à des moments fléchissants plus importants, nécessitent des sections d'armature significativement plus élevées (52,11 et 85,20 cm² respectivement). Pour l'ensemble des poteaux, le ferraillage minimal réglementaire de 8HA20 a été retenu.

L'étude paramétrique comparative a mis en évidence les résultats suivants :

- La configuration DISPOSITION 1 (voiles périphériques continus) offre la rigidité maximale avec une période fondamentale T1 = 0,380 s, mais au prix d'une consommation de matériaux très élevée (280,46 m³ de béton et 28 621 kg d'acier).
- La configuration DISPOSITION 2 (voiles en about L=2) offre le meilleur compromis global : rigidité satisfaisante (T1 = 0,582 s), excellent équilibre bidirectionnel du contreventement, consommation de béton modérée (89,32 m³) et masse d'acier minimale parmi toutes les configurations retenues (9 115 kg).
- La configuration DISPOSITION 5 présente le volume de béton le plus faible (74,58 m³), mais requiert une section d'armature importante (52,11 cm²) pour ses voiles en raison de moments fléchissants élevés.

- La configuration DISPOSITION 7, bien qu'offrant le meilleur équilibre bidirectionnel (écart minimal entre EX et EY), présente une section d'armature très élevée (85,20 cm²) pour les voiles, ce qui pénalise son bilan économique.

Sur la base de l'optimisation par le coût global des matériaux, la configuration DISPOSITION 2 — voiles en about de longueur L = 2 m — a été identifiée comme la configuration optimale. Elle présente le bilan matériaux le plus favorable (89,32 m³ de béton et 9 115 kg d'acier), tout en assurant une rigidité dynamique satisfaisante (T1 = 0,582 s), un équilibre de contreventement conforme aux exigences du RPA 99/2003 dans les deux directions principales, et une économie significative par rapport aux autres configurations, notamment par rapport à la solution périphérique continue (DISPOSITION 1) qui représente le scénario le plus coûteux.

Ce travail confirme l'intérêt et la pertinence d'une démarche d'optimisation paramétrique pour la conception du contreventement mixte des bâtiments en béton armé en zone sismique. Il démontre que la méthode essai-erreur traditionnelle, bien qu'opérationnelle, peut être avantageusement remplacée ou complétée par une approche comparative systématique, permettant d'identifier des solutions structurales plus performantes et plus économiques.

Perspectives

Dans la perspective d'approfondissement de ce travail, plusieurs axes de recherche pourraient être envisagés :

- Étendre l'étude à d'autres typologies de bâtiments (irréguliers en plan ou en élévation, grande hauteur) et à d'autres zones sismiques selon le RPA 99/2003.
- Intégrer une analyse dynamique non linéaire (pushover) pour évaluer le comportement des configurations au-delà du domaine élastique.
- Coupler l'approche paramétrique avec des algorithmes d'optimisation automatique (algorithmes génétiques, optimisation par essaim de particules) pour explorer un espace de solutions plus vaste.
- Réaliser une analyse de sensibilité sur les paramètres sismiques (zone, groupe d'usage, site) afin d'évaluer la robustesse de la configuration optimale identifiée

Références Bibliographiques

[1] : PHILIPPE.BERGER2.free.fr/Bois/Cours/Contreventement1/contreventement1.htm

[2] : Association française du génie parasismique, Guide AFPS Conception parasismique des bâtiments ,01 Juillet 1901

[3] : Dr. TALEB HOSNI ABDERRAHMANE, cours : système de contreventement

[4] : V. Davidovici, Rapport de mission, Séisme de BOUMERDES, 21Mais 2003

[5] : PROF.A. KASSOUL-USB Chlef, cours : ossatures bâtiment, chapitre 3 : les contreventements (2015/2016)

[6] : PROF.A. KASSOUL-USB Chlef, cours : ossatures bâtiment, chapitre 1 : les murs (2015/2016)

[7]: : Chandurkar, P. P., & Pajgade, P. S. (2013). Seismic Analysis of RCC Building with and Without Shear Wall. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 3(3), 1805–1810.

Fintel, M. (1995). Performance of buildings with shear walls in earthquakes of the last thirty years. *PCI Journal*, 40(3), 62–80. https://doi.org/10.15554/pcij.05011995.62.80

Rajasekaran, S. (2009). Response of structures to earthquakes: analysis of shear walls. In *Structural Dynamics of Earthquake Engineering* (pp. 833–863). Woodhead Publishing.

MacLeod, A. (1970). *Shear Wall-Frame Interaction: A Design Aid.*

Taranath, B. S. (1988). *Analysis and Design of Tall Buildings.*

[8]: Ghosh, S. K. (1995). Observations on the performance of structures in the Kobe earthquake of January 17, 1995. *PCI Journal*, 40(2), 14–22. https://doi.org/10.15554/pcij.03011995.14.22

Cando, M. A., Hube, M. A., Parra, P. F., & Arteta, C. A. (2020). Effect of stiffness on the seismic performance of code-conforming reinforced concrete shear wall buildings. *Engineering Structures*, 219, 110724. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110724

[9]: Aly, N., & Galal, K. (2020). Effect of Ductile Shear Wall Ratio and Cross-Section Configuration on Seismic Behavior of Reinforced Concrete Masonry Shear Wall Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 146(4), 04020020. https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002542

[10]: Soydaş, O. (2009). *Evaluation of Shear Wall Indexes for Reinforced Concrete*. (Thèse)

Burak, B., & Comlekoglu, H. G. (2013). Effect of Shear Wall Area to Floor Area Ratio on the Seismic Behavior of Reinforced Concrete Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 139(11), 1928–1937. https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000785

: Rajesh Kumar, Y., & Bharath Kumar, P. (2018). Effect of shear wall area to floor area ratio on seismic performance of R.C. structures. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(4), 844–852.

: Miao, L., Jin, L., Li, D., Du, X., & Zhang, B. (2022). Effect of shear-span ratio and vertical reinforcement ratio on the failure of geometrical-similar RC shear walls. *Engineering Failure Analysis*, 139. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106407

[1]: Computers and Structures, Inc. (2023). *ETABS: Integrated analysis, design and drafting of building systems*. Berkeley, CA, USA: Computers and Structures, Inc.