المملكة المغربية
Royaume du Maroc

Ecole Hassania des Travaux Publics

المدرسة الحسنية للأشغال العمومية

Mémoire du Projet de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état de l'EHTP

Filière : Génie civil

Option : Ingénierie de bâtiment

# Conception, dimensionnement et étude thermique et acoustique d'un bâtiment R + 14 avec un SS à usage de bureaux


Présenté par :

Hanae LAHSAINI
Mohammed BAKHARI

Encadré par :

Pr. AZMI Malika (EHTP)
M. TARZI Abdallah ( BETEC)


Juin 2014

B.E.T.E.C

www.cours-genie-civil.com

# Dédicaces

*A mes très chers parents,*

*A mon frère et à mes sœurs,*

*A tous mes amis,*

*Je dédie ce modeste travail.*

*Hanae LAHSAINI*

*A mes très chers parents,*

*A mes très chères sœurs,*

*A ma précieuse fiancée,*

*A tous mes amis,*

*Je dédie ce modeste travail.*

*Mohammed BAKHARI*

# Remerciements

Nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce projet.

A notre encadrante interne, **Mme. AZMI**, nous adressons notre reconnaissance pour son encadrement spécial, sa disponibilité permanente et les efforts qu'elle a déployés afin de pousser à l'avant notre projet.

Nous tenons à remercier, **M. TARZI**, le directeur général du bureau d'études **BETEC**, pour les conseils prestigieux qu'il nous a prodigués.

Nous tenons à remercier aussi tous les membres du jury pour leur bienveillance à vouloir évaluer notre travail.

Par ailleurs, nous présentons nos remerciements particuliers à **M. ABBAR**, directeur technique de BEPOL, et à **M. BOUKHARI** et **M. BENHAMMOU**, professeurs à l'EHTP, pour le soutien qu'ils nous ont apportés.


www.cours-genie-civil.com

# Résumé

Ce présent rapport expose les différentes étapes menées lors de notre projet de fin d'études. L'objectif visé par ce projet est de concevoir et dimensionner, en béton armé, un immeuble d'usage de bureaux composé d'un sous-sol, un-rez-de chaussée et 14 étages tout en respectant l'aspect thermique et acoustique réglementaire. C'est un bâtiment construit dans le cadre.

Pour ce faire, la première étape consiste à concevoir notre bâtiment. Nous optons donc pour des planchers champignons reposant directement sur les poteaux. D'autre part la stabilité horizontale de l'immeuble et la reprise des charges horizontales dues aux effets du vent sont assurées, via les dalles, par les murs de contreventement délimitant les cages d'escaliers et d'ascenseurs.

Le calcul du bâtiment est fait à la base des règles de béton armé aux états limites (B.A.E.L.91), le RPS pour tout ce qui est lié aux dispositions parasismiques, la NV65 pour le calcul du vent, la RTBM pour le calcul du bilan thermique ainsi que la NRA2000 pour l'évaluation de l'isolation acoustique.

Le calcul manuel est effectué pour quelques éléments structuraux qui répondent aux hypothèses prescrites dans les normes alors que le calcul de la structure toute entière est fait en ayant recours aux logiciels CBS Pro et Robot pour.

Une fois que l'étude de la structure en béton armé a bien été assimilée, le but était bien sûr de voir quels moyens seraient mis en œuvre pour remédier aux déperditions thermiques et acoustiques. Pour répondre aux exigences thermiques et acoustiques tout en restant dans une marge économique raisonnable, nous choisissons de mettre en œuvre des isolants thermiques de type laine de roche, de l'enduit en plâtre ainsi qu'un double vitrage dont les spécifications thermiques et acoustiques sont bien déterminées.


www.cours-genie-civil.com

# Sommaire :

*Introduction* ..... *1*

*Chapitre 1 : Présentation du projet* ..... *2*

I. Projet Casablanca Marina : ..... 2
II. Présentation du bâtiment étudié : ..... 4

*Chapitre 2: Etude bibliographique* ..... *5*

**A) A propos de la structure des bâtiments :** ..... **5**
I. Sécurité et protection contre l'incendie : ..... 5
I.1. Articles du code : ..... 5
I.2. Règles constructives : ..... 5
I.2.1. Poteau : ..... 5
I.2.2. Voile: ..... 5
I.2.3. Plancher : ..... 5
II. Conception de système de contreventement: ..... 6
II.1. Système de contreventement : ..... 6
II.1.1. Portiques : ..... 6
II.1.2. Système de refends : ..... 6
II.1.3. Structure mixte à refends-portiques : ..... 7
II.1.4. Noyau central : ..... 7
II.1.5. Structure mixte noyau central-façade : ..... 7
II.2. Comparaison des solutions : ..... 7
II.2.1. Du point de vue des charges permanentes : ..... 7
II.2.2. Du point de vue de la résistance au vent et aux séismes : ..... 7
II.2.3. Du point de vue du confort thermique et acoustique : ..... 8
II.2.4. Du point de vue sécurité : ..... 8
III. Conception des planchers : ..... 8
III.1. Dalle pleine en béton armé : ..... 8
III.2. Dalle nervurée : ..... 9
III.3. Dalle à caisson : ..... 10
III.4. Dalle champignon : ..... 10
III.5. Dalle à hourdis et poutrelles : ..... 11
III.6. Dalle alvéolées : ..... 11

**B) A propos du traitement thermique :** ..... **12**
I. Contexte général : ..... 12
II. La réglementation Thermique des Bâtiments au Maroc **(RTBM) :** ..... 13
II.1. Le zonage : ..... 13
II.2. Spécifications techniques : ..... 14
II.2.1. Une approche globale dite performancielle : ..... 14
II.2.2. Une approche simplifiée dite prescriptive : ..... 14
III. Mode d'isolation : ..... 16

III.1. Toiture : ....16
III.1.1. La toiture chaude : ....16
III.1.2. La toiture inversée : ....16
III.1.3. La toiture combinée : ....16
III.2. Mur : ....17
III.2.1. L'isolation par l'intérieur : ....17
III.2.2. L'isolation par l'extérieur : ....18
III.3. Traitement des ponts thermiques et de condensation: ....19
III.3.1. Cas de l'isolation intérieure : ....19
III.3.2. Cas de l'isolation extérieure : ....22

**C) A propos du traitement acoustique : ....23**
I. Le son : ....23
II. Le décibel : ....23
III. Le bruit : ....23
III.1. Définition et caractéristiques : ....23
III.2. Bruits normalisés : ....24
III.3. Transmission d'un bruit aérien à travers une paroi : ....24
III.4. Les différents bruits dans le bâtiment : ....24

***Chapitre 3 : Modélisation de la structure étudiée ....25***
I. Solution retenue : ....25
II. Hypothèses de calcul : ....25
II.1. Charges permanentes : ....25
II.2. Charges d'exploitation : ....26
II.3. Autres charges : ....27
II.3.1. Charges surfaciques : ....27
II.3.2. Charges linéaires : ....27
II.4. Sol d'assise - Fondations : ....27
III. Prédimensionnement des éléments de structure : ....28
III.1. Dalle : ....28
III.1.1. Résistance à la flexion : ....28
III.1.2. Condition de flèche : ....28
III.2. Poteaux : ....29
III.3. Chapiteaux : ....30
III.4. Voile de contreventement : ....30
IV. Modélisation : ....31
IV.1. Choix de la méthode : ....31
IV.2. Etapes de la modélisation : ....32
IV.3. Modèle CBS : ....32
IV.4. Maillage de la structure : ....32
IV.5. Combinaisons de calcul : ....32

***Chapitre 4 : Calcul de l'action du vent et du séisme ....33***
I. Calcul de l'effet du vent : ....33
I.1. Hypothèses générales : ....33
I.1.1. Direction du vent : ....33
I.1.2. Exposition des surfaces : ....33
I.1.3. Pression dynamique : ....34

I.2. Modification des pressions dynamiques de base :.....34
a. Effet de la hauteur au-dessus du sol :.....34
I.2.1. Effet de site :.....34
I.2.2. Effet de masque :.....35
I.2.3. Effet de dimensions :.....35
I.3. Action dynamique du vent :.....36
I.3.1. Actions parallèles à la direction du vent :.....36
I.3.2. Actions perpendiculaires à la direction du vent :.....39
I.4. Action statique du vent :.....40
II. Etude sismique :.....42
I.1 Hypothèses de calcul :.....42
II.1.1. Sismicité du lieu :.....42
II.1.2. Classe du bâtiment :.....43
II.1.3. Type de site :.....43
II.1.4. Amortissement de la structure :.....44
II.2. Régularité de la structure :.....44
II.2.1. Vérification de la régularité en PLAN :.....44
II.2.2. Vérification de la régularité en ELEVATION :.....45
II.3. Résultats de l'analyse modale :.....45
II.3.1. Combinaisons de Newmark :.....45
II.3.2. Calcul et résultats :.....46
III. Comparaison et vérification :.....49
III.1. Comparaison Vent / séisme :.....49
III.2. Vérification de la structure :.....49
III.2.1. Vérification des déformations :.....49
III.2.2. Vérification de la stabilité :.....51

***Chapitre 5 : Dimensionnement des éléments de structure .....52***

I. Poteaux :.....52
II. Semelles isolées :.....54
III. Voile :.....55
III.1. Ferraillage vertical du mur :.....57
III.2. Ferraillage horizontales parallèles aux faces du mur :.....58
III.3. Vérification :.....58
IV. Radier :.....59
IV.1. Epaisseur du radier :.....59
IV.2. Vérification de la surface du radier :.....60
IV.3. Vérification du soulèvement :.....61
IV.4. Ferraillage du radier :.....61
V. Dalle :.....62
V.1. Méthode de calcul :.....62
V.2. Conditions d'application :.....62
V.3. Notations :.....63
V.4. Calcul des sollicitations :.....63
V.5. Vérification de conditions de résistance aux moments fléchissant :.....65
V.6. Vérification des conditions de résistance aux efforts tranchants :.....68

***Chapitre 6 : Etude et traitement thermique du bâtiment.....69***

I. Bilan thermique :.....69

I.1. Charges internes : ....69
I.1.1. Apport des occupants : ....69
I.1.2. Apports de l'éclairage : ....70
I.1.3. Apport des équipements : ....71
I.2. Charges externes : ....72
I.2.1. Apport de chaleur par transmission surfacique : ....72
I.2.2. Apport de chaleur par transmission linéique : ....72
I.2.3. Apport de chaleur par renouvellement d'air : ....73
I.2.4. Apport par effet de serre : ....74
I.3. Inertie thermique quotidienne du bâtiment : ....74
I.4. Consommation totale d'énergie : ....75
I.4.1. Besoins en chauffage : ....75
I.4.2. Besoins en climatisation : ....75
II. Développement d'un logiciel de calcul thermique « ThermoBAT v1.0 » : ....76
II.1. Présentation du logiciel : ....76
II.1.1. Schéma principe du fonctionnement du logiciel développé : ....77
II.1.2. Données d'entrée du logiciel : ....78
II.1.3. Données de sortie du logiciel : ....79
II.2. Fiabilité de notre logiciel « ThermoBAT v1.0 » : ....80
III. Isolation thermique du bâtiment : ....81
III.1. Caractéristiques des parois vitrées : ....81
III.2. Caractéristiques des allèges : ....81
III.3. Caractéristiques de la toiture : ....82
III.4. Caractéristiques des planchers sur local non climatisé : ....82
III.5. Vérification des performances du bâtiment : ....82
III.5.1. Approche performancielle : ....82
III.5.2. Approche prescriptive : ....82
IV. Impacts de l'application de la RTBM : ....83
IV.1. Surcoûts liés au respect de la réglementation : ....83
IV.2. Gains en énergie : ....84
IV.3. Rentabilité de l'application de la RTBM : ....84

***Chapitre 7 : Isolation acoustique du bâtiment ....85***

I. Isolation acoustique du bâtiment : ....85
I.1. Évaluation de l'environnement sonore de la façade : ....85
I.2. L'indice d'affaiblissement acoustique $R_w$ (C, Ctr) : ....86
I.3. Calcul de l'isolement acoustique normalisé : $D_{nwT}$ ....87
I.4. Isolation par rapport aux bruits d'impacts : ....89
I.5. Exécution et mise en œuvre : ....90

***Conclusions ....91***

***Bibliographie : ....93***

***ANNEXES....95***

# Liste des tableaux

*Tableau 1: Sections minimales des poteaux* ..... 5
*Tableau 2: Epaisseur minimale des voiles* ..... 5
*Tableau 3: Epaisseur minimale des dalles* ..... 5
*Tableau 4: Besoins spécifiques thermiques annuels maximaux de chauffage et de climatisation dans le secteur tertiaire en kWh/m²/an* ..... 14
*Tableau 5: Les exigences limites réglementaires des caractéristiques thermiques de l'enveloppe des bâtiments à usage de bureaux* ..... 15
*Tableau 6: Charges permanentes* ..... 26
*Tableau 7: Charges d'exploitation* ..... 26
*Tableau 8: Charges surfaciques* ..... 27
*Tableau 9: Charges linéaires* ..... 27
*Tableau 10: Diamètres des poteaux* ..... 29
*Tableau 11: Epaisseur des voiles* ..... 31
*Tableau 12: Valeurs des pressions dynamiques* ..... 34
*Tableau 13: Coefficient de site* ..... 34
*Tableau 14: Valeurs limites de pression dynamique* ..... 35
*Tableau 15: Période et Coefficient de réponse* ..... 37
*Tableau 16: Valeurs de β normale et extrême* ..... 37
*Tableau 17: Valeurs de la pression dynamique surfacique* ..... 38
*Tableau 18: Valeurs de la pression dynamique linéaire suivant la direction X* ..... 38
*Tableau 19: Comparaison entre le calcul manuel et le calcul par Robot* ..... 39
*Tableau 20: Valeurs de Ψ0* ..... 41
*Tableau 21: Valeurs des coefficients Ce et Ci* ..... 41
*Tableau 22: Action statique du vent* ..... 42
*Tableau 23: coefficient d'accélération* ..... 42
*Tableau 24: Coefficient de priorité* ..... 43
*Tableau 25: Ductilité et classe de bâtiments* ..... 43
*Tableau 26: Facteur de comportement K* ..... 43
*Tableau 27: Coefficient du site* ..... 44
*Tableau 28: Coefficient d'amortissement* ..... 44
*Tableau 29: Résultats de l'analyse modale pour les trois modes prépondérants* ..... 47
*Tableau 30: Comparaison Vent/ Séisme* ..... 49
*Tableau 31: Déplacement inter-étages* ..... 50
*Tableau 32: Déplacement total* ..... 50
*Tableau 33: Stabilité au renversement* ..... 51
*Tableau 34: Ferraillage longitudinal du poteau P- L7* ..... 53
*Tableau 35: Espacement des armatures transversales* ..... 54
*Tableau 36: Ferraillage de semelle isolée sous le poteau P-L7* ..... 54
*Tableau 37: Caractéristique du voile V4* ..... 55
*Tableau 38:Valeurs forfaitaires du rapport lf / l (tiré du DTU 23.1)* ..... 55
*Tableau 39: Caractéristiques du voile V4* ..... 56
*Tableau 40: Armature transversale* ..... 58
*Tableau 41: Ferraillage vertical de V4* ..... 58
*Tableau 42: Ferraillage horizontal* ..... 58
*Tableau 43: Résultats de vérification* ..... 59
*Tableau 44: Epaisseur du radier sous noyau* ..... 60
*Tableau 45: Charges transmises aux fondations du radier* ..... 60

*Tableau 46: Vérification du soulèvement/ Cas statique* ..... 61
*Tableau 47: Vérification du soulèvement/ Cas sismique* ..... 61
*Tableau 48: Ferraillage du radier* ..... 62
*Tableau 49: Coefficientt de répartition des moments* ..... 67
*Tableau 50: Chaleur dégagée par les personnes* ..... 69
*Tableau 51: Chaleur dégagée par l'éclairage (Lampe fluorescente)* ..... 70
*Tableau 52: Puissance de quelques appareils informatiques* ..... 71
*Tableau 53: Valeurs des coefficients d'échanges superficiels* ..... 72
*Tableau 54: Capacité thermique* ..... 74
*Tableau 55: Résultats de l'approche prescriptive* ..... 82
*Tableau 56: Déboursé sec d'un bâtiment classique sans isolation* ..... 83
*Tableau 57: Déboursé sec d'un bâtiment avec isolation thermique* ..... 83
*Tableau 58: niveau d'exposition au bruit*
*Source :L'acoustique en pratique CHANGER LES FENÊTRES SOLUTIONS ET CONSEILS POUR LES PROFESSIONNELS* ..... 85
*Tableau 59: Valeurs des indices d'affaiblissement des matériaux utilisés source NF EN 12354-3* 86
*Tableau 60: Résultats de calcul du temps de réverbération Tr* ..... 88
*Tableau 61: Résultats de l'analyse acoustique du bâtiment* ..... 89
*Tableau 62: Calcul des rapports des raideurs pour le Sous-Sol* ..... 104
*Tableau 63: Calcul des rapports des raideurs pour les étages courants* ..... 105
*Tableau 64: Vérification du deuxième critère de la régularité en plan* ..... 105
*Tableau 65: Vérification du quatrième critère de la régularité en plan* ..... 106
*Tableau 66: Ecart des masses entre les étages* ..... 106
*Tableau 67: Détail du prédimensionnement des poteaux sur la terrasse.* ..... 108
*Tableau 68: Détail du prédimensionnement des poteaux sur les bureaux* ..... 110
*Tableau 69: Valeurs de Kh par étage* ..... 111
*Tableau 70: Pression dynamique par étage* ..... 111
*Tableau 71: Masses modales dans les directions X et Y* ..... 114
*Tableau 72: Efforts réduits des voiles du sous-sol* ..... 115
*Tableau 73: Ferraillage des voiles du sous-sol* ..... 116
*Tableau 74: Ferraillage des voiles du 7ème étage* ..... 116
*Tableau 75: Données de calcul dans le sens X* ..... 121
*Tableau 76: Données de calcul dans le sens Y* ..... 121
*Tableau 77: Calcul des données d'entrée dans le sens X* ..... 121
*Tableau 78: Calcul des données d'entrée dans le sens Y* ..... 122
*Tableau 79: Moments de base/ Calcul sans chapiteaux* ..... 123
*Tableau 80: Moments maximaux à répartir/ Calcul sans chapiteaux* ..... 123
*Tableau 81: Calcul des efforts tranchants et vérification de poinçonnement / Calcul sans chapiteaux* ..... 123
*Tableau 82: Moments de base/ Calcul avec chapiteaux* ..... 124
*Tableau 83: Moments maximaux à répartir/ Calcul avec chapiteaux* ..... 124
*Tableau 84: Calcul des efforts tranchants et vérification de poinçonnement / Calcul avec chapiteaux* ..... 125
*Tableau 85: Ferraillage manuel de la bande 1/ sens X* ..... 125
*Tableau 86: Ferraillage manuel de la bande 2/ sens X* ..... 125
*Tableau 87: Ferraillage manuel de la bande 1/ sens Y* ..... 126
*Tableau 88: Ferraillage manuel de la bande 2/ sens Y* ..... 126
*Tableau 89 : Ferraillage des appuis du plancher haut du 7ème étage* ..... 129
*Tableau 90 : Ferraillage des panneaux du plancher haut du 7ème étage* ..... 130
*Tableau 91 : Ferraillage des consoles du plancher haut du 7ème étage* ..... 130
*Tableau 92: Classe d'inertie des bâtiments Source :*
*http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/bilan_th.htm* ..... 134
*Tableau 93: Données thermiques d'entrée* ..... 135
*Tableau 94: Indices d'affaiblissement de vitrage NF EN 12354-3 Annexe B* ..... 137
*Tableau 95: Données techniques de l'Alucobond* ..... 137

# Liste des figures

*Figure 1: Consommation d'énergie finale du secteur du bâtiment dans le monde en 2007* ..... 12
*Figure 2: Réalisation correcte d'une isolation par l'intérieur avec isolant perméable à la vapeur.* ..... 21
*Figure 3: Condensation interne en été.* ..... 22
*Figure 4: Energie acoustique : 1 transmise – 2 absorbée – 3 réfléchie* ..... 24
*Figure 5: Diagramme de coefficient de réduction* ..... 35
*Figure 6: Coefficient de réponse* ..... 36
*Figure 7: Valeurs de Y0* ..... 41
*Figure 8: Déformée du premier mode/ flexion selon l'axe X* ..... 48
*Figure 9: Déformée du deuxième mode/ mode de torsion* ..... 48
*Figure 10: déformée du troisième mode/ flexion selon l'axe Y* ..... 48
*Figure 11: Pont thermique* ..... 73
*Figure 12: 1 transmission directe – 2 transmission latérale* ..... 86
*Figure 13: Temps de réverbération Tr* ..... 87
*Figure 14: Jonctions parois séparative / façade* ..... 90
*Figure 15: Dalle flottante* ..... 90
*Figure 16: Protection du groupe de ventilation* ..... 90
*Figure 17: Plan de coffrage du PH du sous-sol* ..... 96
*Figure 18: Plan de coffrage du PH du RDC* ..... 97
*Figure 19: Plan de coffrage du PH du 1er, 2ème et 3ème étage* ..... 98
*Figure 20: Plan de coffrage du 5ème étage* ..... 99
*Figure 21: Plan de coffrage du 6ème étage* ..... 100
*Figure 22: Plan de coffrage du 7ème étage* ..... 101
*Figure 23: Plan de coffrage du 8ème étage* ..... 102
*Figure 24: Plan de coffrage du 9ème au 14ème étage* ..... 103
*Figure 25: Indexation des poteaux du sous-sol* ..... 107
*Figure 26: Ferraillage inférieur du radier* *Figure 27: Ferraillage supérieur du radier* ..... 119
*Figure 28: Ferraillage Ay[-] du radier* ..... 119
*Figure 29: Ferraillage Ay[+] du radier* ..... 119
*Figure 30: Panneaux de calcul/ 7ème étage* ..... 120
*Figure 31: Mxx (ACC+)* *Figure 32: Myy (ACC+)* ..... 127
*Figure 33: Mxx (ACC-)* *Figure 34: Myy (ACC-)* ..... 128
*Figure 35: Ferraillage inférieur du plancher haut 7ème étage* ..... 131
*Figure 36: Ferraillage supérieur du plancher haut 7ème étage* ..... 132
*Figure 37: Vérification des déformations de la dalle* ..... 133

# INTRODUCTION

L'élaboration d'un projet de bâtiment est faite pour répondre à plusieurs conditions en termes de la mise en abri des occupants de conditions extérieures et du respect de l'usage particulier fixé par le maître d'ouvrage. Mais cela ne signifie pas que notre travail consiste seulement à concevoir un produit conforme aux attentes du client, mais à concevoir un produit conforme aussi au droit et aux règles qui en découlent.

Le bâtiment faisant l'objet de la présente étude est un bâtiment à usage de bureaux. Il est donc conçu sous forme de plateaux sans cloisons permettant ainsi de grouper un nombre important de personnes et de modifier facilement la disposition des bureaux.

Le calcul de cet ouvrage est élaboré de manière à présenter durant toute sa durée d'exploitation des sécurités appropriées vis-à-vis :

- de sa ruine ou de celle de l'un quelconque de ses éléments ;
- d'un comportement en service susceptible d'affecter gravement sa durabilité, son aspect ou encore sa fonctionnalité.

Nous sommes donc amenés à bien évaluer les actions appliquées à la construction afin de pouvoir calculer les sollicitations résultantes et déterminer les dimensions ainsi que le ferraillage nécessaire avec les dispositions constructives préconisées.

Le bâtiment doit d'une part être stable et fonctionnel, et d'autre part présenter un certain niveau de confort. Ce confort est caractérisé par l'isolation du bâtiment vis-à-vis du contexte extérieur. De ce fait nous nous intéressons dans notre étude à l'isolation thermique et acoustique de notre structure.

En effet, une isolation thermique de l'enveloppe de bâtiment s'avère intéressante et rentable et doit s'entendre aussi bien vis-à-vis du froid que vis-à-vis de chaleur. Une étude donc soignée de l'isolation thermique va non seulement assurer le confort des usagers mais aussi diminuer la consommation en énergie.

Pour l'isolation acoustique qui est un élément négligeable mais reste une science complexe peu exploré dont la méconnaissance entraîne des défauts très gênants surtout pour les constructions à usage collectif. Elle doit être assurée contre les bruits aériens surtout ceux provenant de l'extérieur ainsi qu'aux bruits de chocs et d'équipements.

# CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DU PROJET

## I. Projet Casablanca Marina :

Le projet « Casablanca Marina » constitue un projet novateur qui ambitionne de positionner la ville de Casablanca dans le giron de grandes métropoles économiques et touristiques.

Ce projet structurant a une valeur de symbole au regard de son implantation exceptionnelle à proximité :

- Du port de Casablanca, un des ports les plus dynamiques du continent africain et de l'Atlantique ;
- De la gare ferroviaire de Casa Port qui assure des dessertes directes avec l'aéroport Mohamed V ;
- De la Grande Mosquée Hassan II, un des plus imposants lieux de culte musulman au monde ;
- De la Médina, un des quartiers les plus populaires de Casablanca et lieu mythique des villes marocaines.

Le projet se développe sur une emprise totale de 26 hectares, dont 10 hectares gagnés sur la mer grâce à de gigantesques travaux d'extension et de protection maritime, le long du boulevard des Almohades, sur un linéaire de 1.400 mètres entre les chantiers navals et la Grande Mosquée.

Conçu comme le nouveau pôle multifonctionnel de la ville de Casablanca, le projet Marina Casablanca est un aménagement visionnaire, cohérent, de qualité, visant un objectif urbain ambitieux : renforcer le lien ancestral entre la ville et l'Océan.

Le programme prévu totalise une surface globale de l'ordre de 476.600 m² de planchers, hors parkings, avec des vocations multiples :

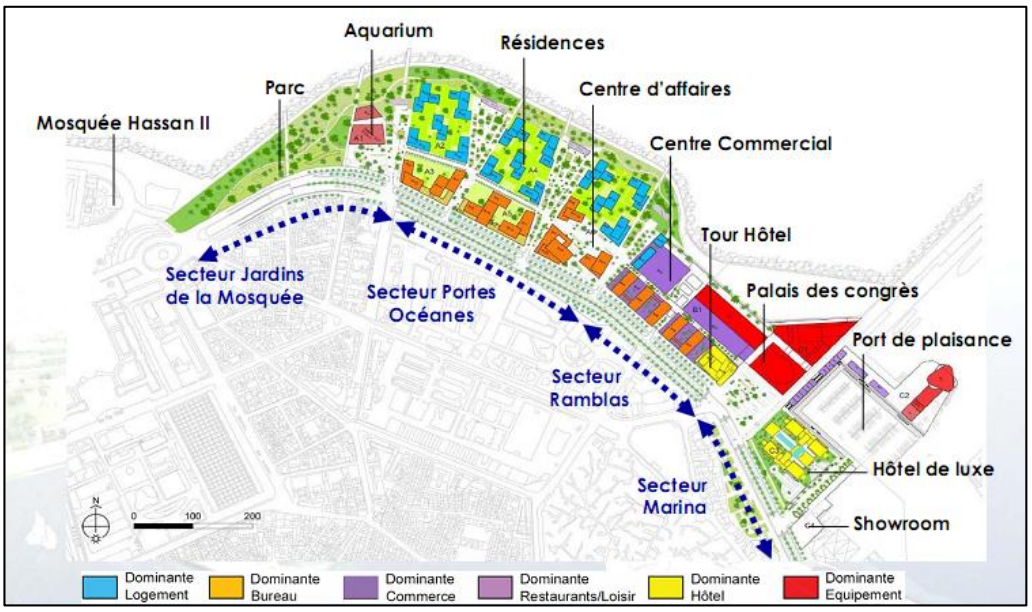
- Hôtellerie : 12% ;
- Commerce : 15% ;
- Équipements de loisirs, services et animations : 10% ;
- Résidentiel : 30% ;
- Bureaux : 33%.

Le projet est structuré en quatre secteurs à vocations distinctes :

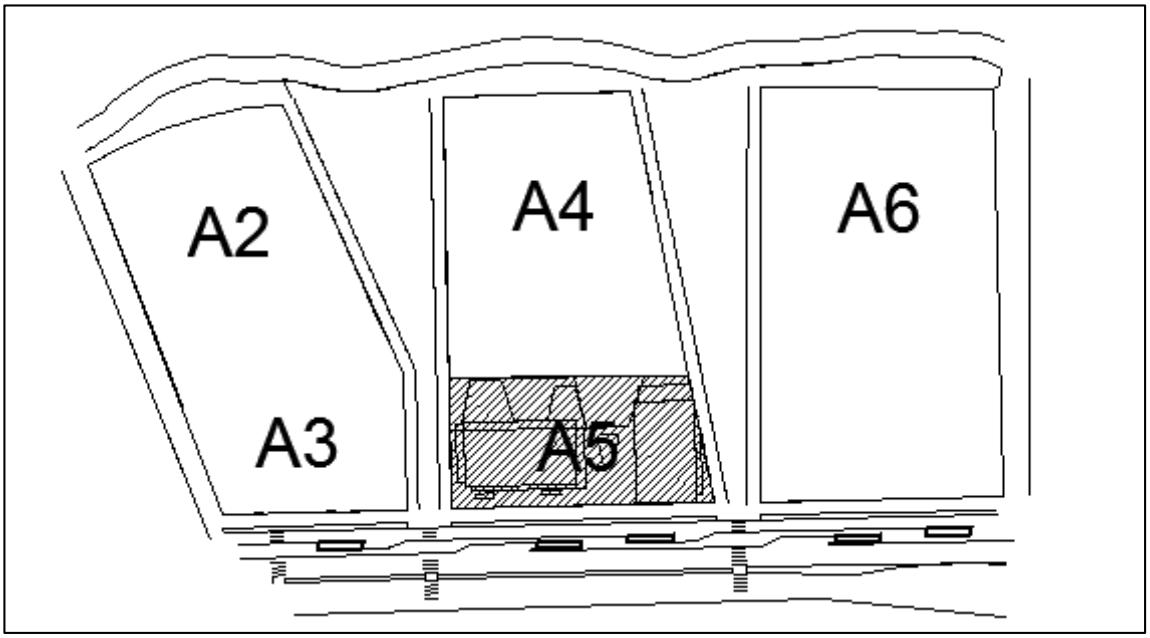
- Le secteur Marina ;
- Le secteur Ramblas ;
- Le secteur Portes Océanes ;
- Le secteur Jardins de la Grande Mosquée.

Sur plus de 1,5 kilomètre, la balade des jardins est un espace piéton qui permet la traversée de tout le projet dans un cadre agréable, au milieu d'espaces verts et de kiosques de commerces et de restauration.

La balade marine offre, sur plus d'un kilomètre, une vue directe sur la mer, espace idéal autant pour le jogging matinal, que pour les amateurs de la pêche à la canne. Plus de 5.000 places en espaces de parking souterrains sont prévues pour couvrir la demande du projet et maximiser les espaces piétons en surface.



## II. Présentation du bâtiment étudié :




La structure étudiée est un immeuble à usage de bureaux composé d'un sous-sol, un rez-de-chaussée et 14 étages. Elle appartient au secteur « Portes océanes – ilot A5 ».

Il s'agit en fait de deux immeubles ; un immeuble A composée d'un sous-sol, RDC et 12 étages et un autre B composé d'un sous-sol, RDC et 14 étages. Le sous-sol, le RDC et les trois premiers étages sont communs pour les deux immeubles. Notre étude portera sur l'immeuble B.

Les niveaux sont répartis comme suit :

- Le sous-sol est réservé pour des parkings de voitures et des locaux techniques ;
- Le RDC et le premier étage (mezzanine) sont dédiés aux commerces ;
- Les étages courants comportent des plateaux de bureaux ;
- La terrasse est non accessible ;
- La terrasse accessible contenant un jardin se situant au niveau du plancher haut du troisième étage.

# CHAPITRE 2: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## A) A propos de la structure des bâtiments :

### I. Sécurité et protection contre l'incendie :

Un bâtiment doit respecter les règles générales de sécurité et les mesures d'entretien fixées par *le Code de la construction et de l'habitation* français applicable au Maroc.

#### *I.1. Articles du code :*

Les articles **R121-2, R122-2, R122-5, R122-9, R122-10** présentent les éléments importants à respecter pour tout projet de bâtiment et assurer donc sa sécurité.

#### *I.2. Règles constructives :*

Pour pouvoir tenir compte de l'action du feu sur une structure, le respect des règles FB, qui définissent les justifications et les vérifications à effectuer, s'avère nécessaire.

##### I.2.1. Poteau :

| **Résistance au feu** | | **1/2h** | **1h** | **1h 1/2** | **2h** | **3h** | **4h** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| a (cm) | Poteau carré | 15 | 20 | 24 | 30 | 36 | 45 |
| | Poteau carré exposé 1 face au feu | 10 | 12 | 14 | 16 | 20 | 26 |
| | Poteau b=5a | 10 | 12 | 14 | 16 | 20 | 26 |

*Tableau 1: Sections minimales des poteaux*

##### I.2.2. Voile:

| **Résistance au feu** | | **1/2h** | **1h** | **1h 1/2** | **2h** | **3h** | **4h** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| a (cm) | | 10 | 11 | 13 | 15 | 20 | 25 |
| U (cm) | Cas des aciers au pourcentage | néant | | | | | |
| | Cas des aciers pris en compte dans les calculs | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 |

*Tableau 2: Epaisseur minimale des voiles*

##### I.2.3. Plancher :

| **Résistance au feu** | | **1/2h** | **1h** | **1h 1/2** | **2h** | **3h** | **4h** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Epaisseur minimale h + e (cm) | | 6 | 7 | 9 | 11 | 15 | 17,5 |
| Sans aciers sur appuis $M_w+M_e / 2.M_0 = 0$ | U (cm) | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 |
| | $(I_{sw} + I_{se})/I$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Avec aciers sur appuis avec consoles $M_w + M_e / 2.M_0 > 0,5$ | U (cm) | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3,5 | 4,5 |
| | $(I_{sw} + I_{se})/I$ | 0,25 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,55 | 0,6 |

*Tableau 3: Epaisseur minimale des dalles*


www.cours-genie-civil.com

## II. Conception de système de contreventement:

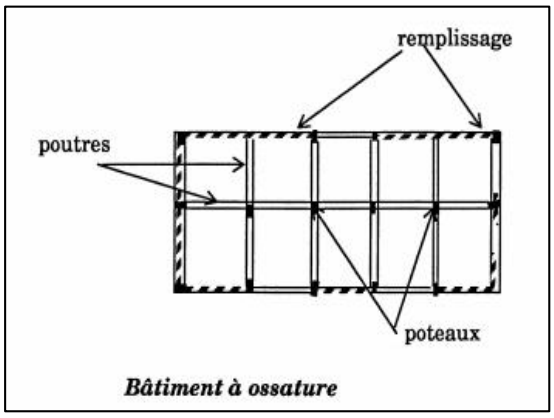
La conception et le choix des détails constructifs de la structure porteuse et des éléments non-porteurs jouent un rôle déterminant dans la tenue des bâtiments et leur vulnérabilité face aux séismes. En effet, aussi poussés soient-ils, les calculs d'ingénieur et le dimensionnement ne sont pas à même de compenser à posteriori les erreurs ou les défauts de conception au plan parasismique. Il est en outre impératif de concevoir les bâtiments selon les règles parasismiques afin de pouvoir les doter d'une bonne tenue aux tremblements de terre sans occasionner de surcoûts notables. A ce fait la conception moderne d'un bâtiment implique en général que chacun des éléments constituant la structure reprenne uniquement les sollicitations qu'il est le mieux à même de supporter.

Lorsqu'il s'agit de concevoir un bâtiment il ne suffit pas d'associer l'ingénieur civil à la fin du processus, en lui confiant le mandat consistant à «calculer» la structure porteuse pour résister aux séismes. Il s'agit d'une mauvaise démarche qui peut avoir de graves conséquences et occasionner des surcoûts importants. Il est donc beaucoup plus judicieux et plus avantageux de travailler de concert. L'architecte et l'ingénieur prennent en compte les souhaits esthétiques et les impératifs fonctionnels pour élaborer ensemble une structure porteuse, sûre et efficace. Et ce pour pouvoir choisir des cloisons intérieures et des éléments de façade dont la déformabilité est compatible avec la structure porteuse.

### *II.1. Système de contreventement :*

#### II.1.1. Portiques :

Il s'agit d'une ossature composée de poteaux et poutres à nœuds rigides ou d'une charpente contreventée, capable de résister aussi bien aux charges verticales qu'aux charges horizontales.

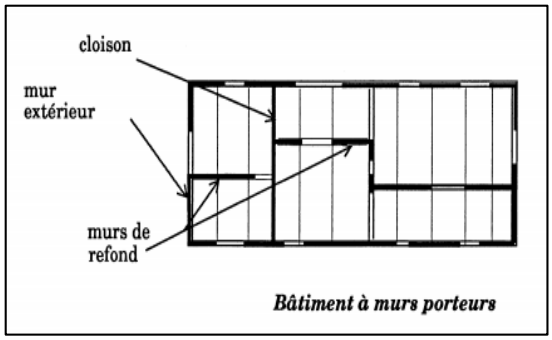


*Bâtiment à ossature*

Les portiques en béton armé ont connu un essor remarquable après la découverte de méthodes de calcul simplifiées (la méthode de Cross par exemple). Cette structure continue d'être utilisée pour des immeubles de faible et moyenne hauteur, cependant elle devient onéreuse et de conception lourde pour des bâtiments de plus de 10 à 15 niveaux.

#### II.1.2. Système de refends :

Au fur et à mesure que la nécessité de construire des immeubles de plus en plus hauts se faisait sentir, les portiques ont commencé à être remplacés par des refends disposés au droit des cages d'escalier et des ascenseurs. Les refends linéaires se sont avérés satisfaisants de point de vue économique pour des immeubles ne dépassant pas 20 à 25 niveaux.



*Bâtiment à murs porteurs*

Le système est constitué de plusieurs murs isolés ou couplés, destinés à résister aux forces verticales et horizontales. Les murs couplés sont reliés entre eux par des linteaux régulièrement espacés et adéquatement renforcés.

#### II.1.3. Structure mixte à refends-portiques :

Dans certains cas où les refends ne suffisent plus à assurer le contreventement, une liaison avec des portiques permet d'augmenter leur capacité de résistance. Le calcul manuel est délicat mais les avancées informatiques ont rendu possible l'étude d'exécution de telles structures.

C'est un système structural composé de portiques et de voiles où les charges verticales sont, à 80% et plus, prises par les portiques. La résistance aux efforts latéraux est assurée par les refends et les portiques proportionnellement à leurs rigidités respectives.

#### II.1.4. Noyau central :

Les limites des structures comprenant des refends se sont fait sentir dès que les bâtiments-tour ont été conçus pour l'usage de bureaux.

Les premiers à chercher de nouvelles structures ont été les ingénieurs américains, obligés par les architectes à dégager l'espace utile des immeubles. Pour ce faire, les américains ont pensé à concentrer les services (ascenseurs, escaliers, toilettes) dans un noyau central, laissant un grand espace libre sans cloisons, et muni d'une installation d'air conditionné. On obtient la structure type « Noyau central » ; Celui-ci assurant le contreventement du bâtiment, tandis que les poteaux, sur la périphérie, ne sont destinés à transmette aux fondations que des charges verticales.

En tout état de cause, le noyau central reste économique jusqu'à 50-60 niveaux ; son exécution est aisée grâce au coffrage glissant.

#### II.1.5. Structure mixte noyau central-façade :

Une augmentation très importante de la capacité de contreventement des bâtiments est obtenue en faisant participer la façade au contreventement au plus du noyau.

### *II.2. Comparaison des solutions :*

#### II.2.1. Du point de vue des charges permanentes :

Un bâtiment à ossature peut ne comporter que des cloisons légères ainsi que des façades dont le rôle consiste à résister au vent, à la pluie et à la chaleur ce qui peut être rempli par des matériaux légers. De ce fait il est beaucoup moins lourd qu'un bâtiment à murs porteurs dont la faible résistance en compression conduit à des épaisseurs importantes. Il permet donc la réalisation de bâtiments plus élevés, à charge égale sur les fondations.

#### II.2.2. Du point de vue de la résistance au vent et aux séismes :

Un bâtiment à murs porteurs, lourd, présente une grande stabilité vis-à-vis du vent ; Dans le cas des bâtiments à ossature le vent introduit des efforts de flexion importants qui peuvent être source de vibrations importantes. Les bâtiments à ossature sont aussi très vulnérables aux séismes pour la même raison.

Notons cependant que l'effort sismique induit, étant proportionnel à la masse, augmente considérablement dans le cas de bâtiment à murs porteurs.

#### II.2.3. Du point de vue du confort thermique et acoustique :

La masse importante des murs porteurs constitue un écran très satisfaisant vis-à-vis du bruit et des variations thermiques.
Les bâtiments sont beaucoup plus sensibles aux variations thermiques. La température des éléments varie rapidement. Les bâtiments à ossature nécessiteront donc des joints de dilatation plus nombreux.

#### II.2.4. Du point de vue sécurité :

Des précautions spéciales devront être prises dans les bâtiments à ossature, pour éviter la propagation du feu par les façades très légères et pour assurer une durée de résistance au feu suffisante des poteaux d'ossature, qui sont tous vulnérables.

## III. Conception des planchers :

Un plancher est une surface horizontale séparant deux niveaux successifs dans une construction et recueillant les surcharges de fonctionnement du bâtiment, il a d'autres fonctions très importantes relatives au confort thermique et acoustique, à la sécurité – protection incendie – et à l'esthétique, sans oublier le rôle technique de support de canalisations et réseaux divers.

Sa fonction principale consiste à :

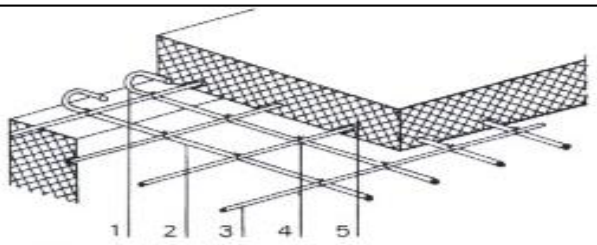
- Supporter les charges (poids des structures et actions permanentes) et les surcharges (actions variables et accidentelles) et les transmettre aux éléments porteurs à savoir les murs et les poteaux ;
- Transmettre des efforts horizontaux aux éléments de contreventement (diaphragme) ;
- Conserver une certaine élasticité dans les limites acceptables ;
- Assurer une bonne isolation phonique ;
- Assurer l'isolation thermique ;
- Protéger quelquefois contre l'humidité ;
- Résister au feu ;
- Permettre la distribution de fluides, particulièrement l'électricité.

Nous distinguons entre différents types de plancher, dans la suite nous citons quelques-uns :

### *III.1. Dalle pleine en béton armé :*

La dalle pleine, appelée aussi « dalle massive » est une plaque dont l'épaisseur est petite par rapport à ses autres dimensions. Son épaisseur est de l'ordre de 1/30 de la portée. Dans les bâtiments courants, elle varie entre 12 cm et 18 cm. Dans les bâtiments industriels, cette épaisseur est souvent plus forte.

La dalle pleine peut travailler dans un seul ou dans deux sens. C'est un type de plancher très courant car, il permet une grande souplesse dans les portées et les formes, en particulier la facilité des divers percements et la possibilité de noyer les réseaux dans son épaisseur.

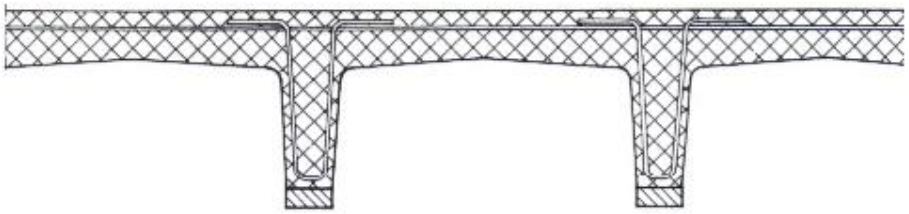



**17.17**
Schéma d'une dalle pleine en béton armé.
1. Crochet d'adhérence.
2. Armature principale, généralement dans le sens de la plus petite portée.
3. Armature de répartition posée sur l'armature principale.
4. Ligature assurant un canevas indéformable.
5. Béton dosé généralement à 300 kg/m$^3$; n'est mis en place qu'après le contrôle de l'armature.

La dalle pleine nécessite un coffrage sur toute sa surface, ce qui provoque une consommation importante de bois.

Les portées courantes de ces dalles L sont de 8m si bi-appuyée et 10m si appuyé sur 4 côté. Ces dalles portent sur un réseau de poutres secondaires et de poutres principales perpendiculaires aux précédentes et leurs transmettent les différentes charges et surcharges.

### *III.2. Dalle nervurée :*



**17.20**
Plancher à nervures.
La largeur des nervures doit être choisie de façon telle que les armatures puissent être disposées et enrobées d'une manière convenable.

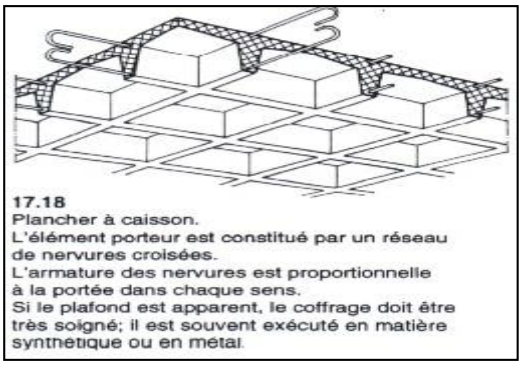
Il s'agit d'une dalle plus légère que la dalle pleine. C'est un plancher constitué par une dalle générale d'épaisseur relativement faible et qui varie entre 4cm et 10 cm, et par des poutrelles rapprochées avec *L*.

La hauteur totale *H* (Nervure + Dalle) varie de 25 cm à 35 cm. La dalle nervurée est indiquée pour couvrir des locaux de forme allongée. Elle porte dans un seul sens. Lorsque la portée *L* dépasse 4 m, il est nécessaire de prévoir une ou plusieurs nervures transversales de raidissement afin de solidariser les autres nervures.
Ce type de dalle offre moins de souplesse d'utilisation que la dalle pleine mais une grande rigidité aux charges verticales.
La conception des planchers nervurés s'apparente aux dalles sur poutrelles du moins dans la constitution du système constructif. Ainsi les poutrelles sont remplacées par des nervures en béton armé, dont l'inertie souvent non négligeable comparée à celle des poutrelles, offre une grande rigidité aux charges verticales pour ce type de plancher.
Dans ce type de plancher la portée des poutres principales peut atteindre 15 mètres.

### *III.3. Dalle à caisson :*

C'est une dalle à nervures, dont les nervures sont dans les deux sens et se croisent. Elle est indiquée pour couvrir des locaux de forme carrée ou presque carrée.

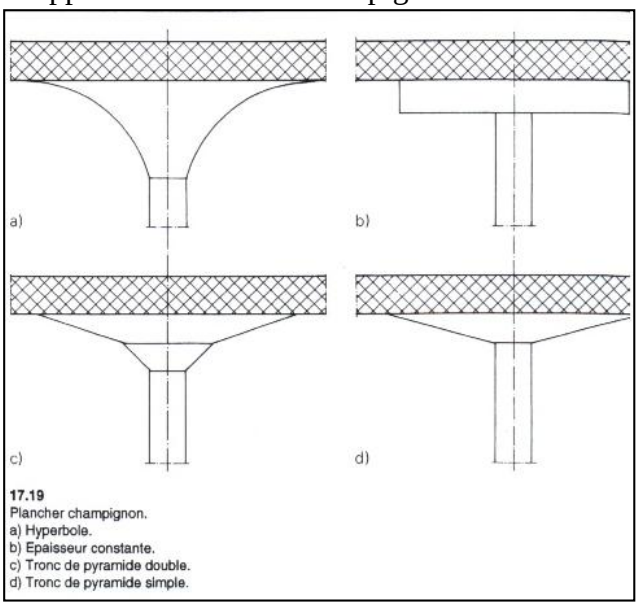
Son aspect est acceptable en sous face alors que son coffrage est délicat et elle nécessite un béton de très bonne qualité.



17.18
Plancher à caisson.
L'élément porteur est constitué par un réseau de nervures croisées.
L'armature des nervures est proportionnelle à la portée dans chaque sens.
Si le plafond est apparent, le coffrage doit être très soigné; il est souvent exécuté en matière synthétique ou en métal.

### *III.4. Dalle champignon :*

Les dalles champignons sont utilisées quand les hauteurs de la construction sont faibles et quand on veut éviter la présence de poutres apparentes. La dalle champignon est constituée par une dalle continue, sans nervures, armée dans les deux sens reposant directement sur des poteaux et constituent avec ces derniers un cadre dans l'espace.




17.19
Plancher champignon.
a) Hyperbole.
b) Epaisseur constante.
c) Tronc de pyramide double.
d) Tronc de pyramide simple.

Cette dalle transmet aux poteaux des réactions importantes, d'où risques de poinçonnement de la dalle autour des poteaux. Pour remédier à ce phénomène, on élargit le sommet des poteaux sous forme de champignon (chapiteau). Il s'agit d'un tronc de pyramide ou d'un tronc de cône apparent sous le plancher.

L'écartement des poteaux $L$ varie de 8 à 12 m dans chaque sens, dans certaines exécutions, ces écartements sont de 22 m à 25 m.

L'épaisseur de la dalle varie de 15 cm à 35 cm.

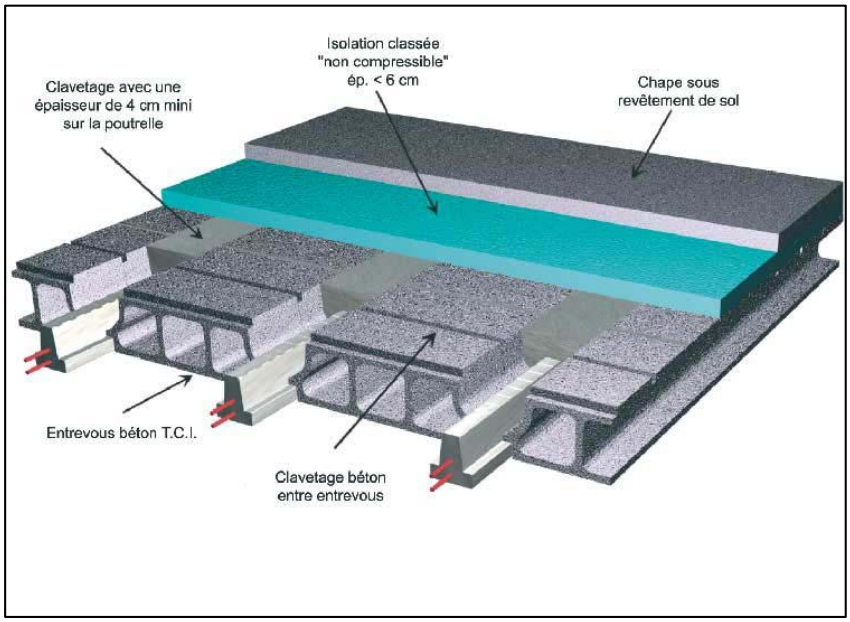
Quoique sa mise en œuvre soit délicate elle offre la possibilité de charge importante.

### III.5. Dalle à hourdis et poutrelles :

Cette solution, très communément employées dans les bâtiments d'habitation consiste à utiliser des corps creux et des poutrelles en béton armé.
On pose à intervalles réguliers des poutrelles en béton armé préfabriquées et on remplit l'intervalle avec des hourdis de terre cuite, de béton,…

Les parois latérales est supérieurs des hourdis servent de coffrage aux poutrelles et à la dalle de compression en béton coulé sur toute la surface du plancher. La paroi inférieure sert de support à l'enduit de plafond en plâtre ou en mortier de ciment.

La dalle de compression est armée d'un simple quadrillage d'armatures constitué, en général, par une nappe de treillis soudé d'un espacement de 20 cm x 30 cm au maximum.




### III.6. Dalle alvéolées :

Ce type de dalle est utilisé dans les locaux exigeant de grandes surfaces libres de tout point d'appui.
Elle présente plusieurs avantages à savoir le temps d'exécution très réduit, la possibilité de grande portée (jusqu'à 16 m), la réduction du poids propre ainsi que le très bon comportement au feu.

| **Epaisseur** | 20 cm | 26 cm | 30 cm | 34 cm |
|---|---|---|---|---|
| **Portée** | 9 m | 13 m | 14 m | 15 m |

Mais, son coût est très élevé, elle nécessite un levage de forte puissance et peut avoir des problèmes de stockage sur chantier.

## B) A propos du traitement thermique :

### I. Contexte général :

Au niveau mondial, le secteur du bâtiment représente à lui seul autour de 35 % de la consommation d'énergie finale et contribue à hauteur d'un tiers environ des émissions de CO2, comme le montre le graphique suivant :

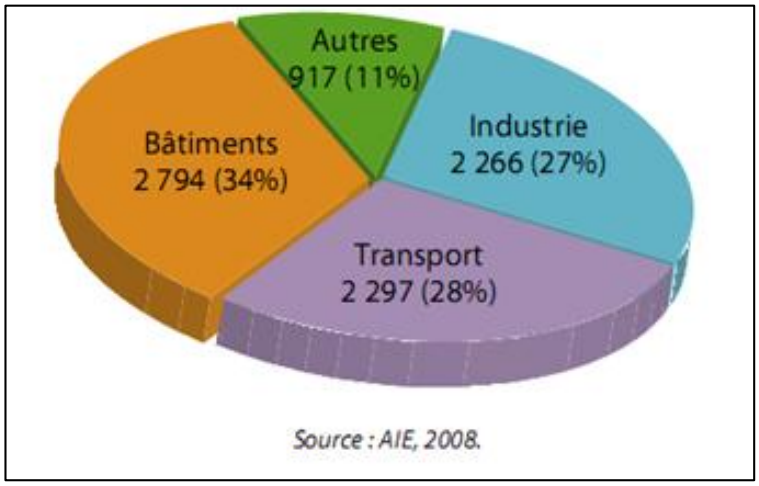



*Figure 1: Consommation d'énergie finale du secteur du bâtiment dans le monde en 2007*

Par ailleurs, il est estimé que le potentiel d'économies d'énergie dans ce secteur au niveau mondial est de l'ordre de 40%, et ce en grande partie via des mesures économiquement rentables. C'est également un secteur éminemment stratégique du fait de la longue durée de vie des bâtiments : les constructions d'aujourd'hui conditionneront durablement les consommations de demain et un bâtiment bien pensé dès sa conception sera toujours plus performant et moins coûteux qu'un bâtiment rénové a posteriori.

L'amélioration des performances thermiques s'avère donc parmi les principales mesures structurelles d'efficacité énergétique dans ce secteur, compte tenue de la durée de son impact dans le temps. Ce type de mesures est d'autant plus important que le Maroc connaisse aujourd'hui un développement sans précédent du marché de la construction.

La réglementation thermique des nouveaux bâtiments est l'un des instruments majeurs pour la transformation du marché de la construction envers un mode plus efficace en énergie.

Pour ces raisons, les dispositions réglementaires en vue au Maroc focalisent dans un premier temps sur les performances de l'enveloppe des bâtiments, mais seront élargies dans un deuxième temps à d'autres composantes importantes, telles que les équipements énergétiques, la gestion des services d'énergie, l'aménagement urbain, etc.

La réglementation Thermique des Bâtiments au Maroc **(RTBM)** vise essentiellement à améliorer les performances thermiques :

- Réduire les besoins de chauffage et de climatisations des bâtiments ;
- Améliorer le confort des bâtiments non climatisés ;
- Réduire la puissance des équipements de chauffage et de climatisation à installer ;

- Inciter les architectes, ingénieurs et maîtres d'œuvre à l'utilisation des approches de conception thermique performante de l'enveloppe du bâtiment ;
- Mettre à la disposition des maîtres d'ouvrage, décideurs publics et bailleurs de fonds, un outil permettant d'améliorer la productivité de leurs investissements ;
- Aider à la réalisation de diagnostics énergétiques des bâtiments existants.

## II. La réglementation Thermique des Bâtiments au Maroc (RTBM) :

L'élaboration de la réglementation thermique des bâtiments au Maroc repose sur un ensemble de données et d'hypothèses de base tout en évaluant leur fiabilité et leur impact au niveau du consommateur final ainsi qu'au niveau de l'Etat et de la collectivité.

### *II.1. Le zonage :*

Le territoire Marocain a été subdivisé en zones climatiques homogènes en se basant sur l'analyse des données climatiques enregistrées par 37 stations météorologiques sur la période de 1999-2008 (10 ans). La construction des zones a été effectuée selon le critère du nombre de degrés jours d'hiver et le nombre de degrés-jours d'été.

Deux types de zonage ont été donc établis:

- Un zonage sur la base des degrés jours de chauffage à base 18 °C ;
- Un zonage sur la base des degrés jours de climatisation à base 21 °C.

*Degré-jours de Chauffage :*

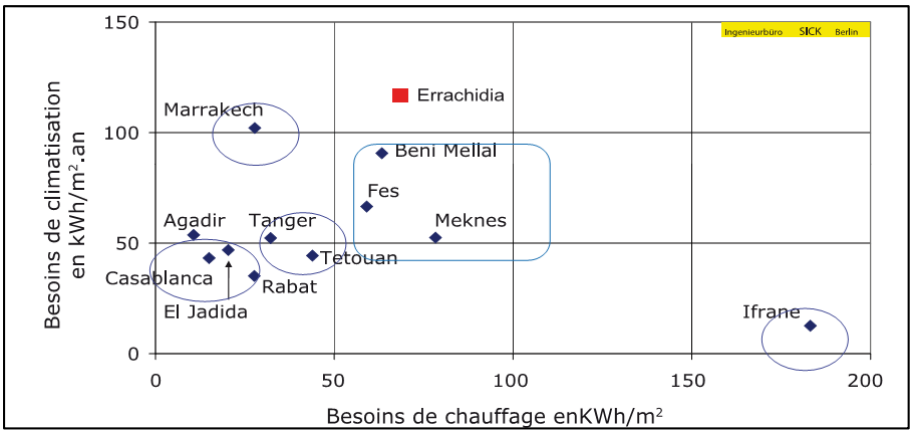
Mesure de la différence entre la température moyenne d'un jour donné par rapport à une température de référence et qui exprime les besoins en chauffage domestique. La température de référence utilisée est 18°C puisqu'en moyenne, quand la température extérieure tombe sous cette barre, on doit chauffer l'intérieur pour y maintenir une température agréable. Or lorsque la température extérieure est 18 °C les gains internes peuvent augmenter la température intérieure au-dessus de 20°C et on n'a pas besoin de chauffer.

*Degré-jours de climatisation :*

Identique au degré-jour de chauffage sauf qu'il mesure les besoins en climatisation domestique au cours des mois chauds d'été par rapport à une température de référence. La température de référence utilisée est 21 °C. Lorsque la température extérieure est 21 °C les gains internes peuvent augmenter la température intérieure au-dessus de 24 °C – 26 °C et impliquent des besoins de climatisation.

Toutefois, pour des raisons pratiques, il n'est pas possible d'adopter, pour la réglementation thermique, deux zonages saisonniers différents. Ainsi, un zonage climatique unique pour les besoins de la réglementation thermique a été réalisé par les experts internationaux avec des fichiers climatiques annuels horaires, sur la base des résultats de simulations des besoins thermiques annuels de chauffage et de climatisation des bâtiments dans onze villes marocaines représentatives.

Ainsi, en définitif, la carte du zonage final comprend six zones climatiques représentées par les villes suivantes : **Zone 1 : Agadir ; Zone 2 : Tanger ; Zone 3 : Fès ; Zone 4 : Ifrane ; Zone 5 : Marrakech ; Zone 6 : Errachidia.**




## *II.2. Spécifications techniques :*

Notre structure est un bâtiment à usage de bureaux. Nous présentons dans ce qui suit les spécifications techniques de la réglementation et leurs impacts pour le secteur tertiaire.

Les spécifications techniques minimales des performances thermiques peuvent être exprimées, pour chaque zone climatique et chaque type de bâtiment, de deux manières :

### II.2.1. Une approche globale dite performancielle :

Les spécifications sont dans ce cas exprimées en termes d'exigences minimales en besoins spécifiques annuels de chauffage et de climatisation, par rapport à des températures intérieures de référence (20°C pour le chauffage et 26°C pour la climatisation). Il est à noter que la vérification de ces spécifications nécessite le recours à un outil de simulation.
Selon cette approche, les spécifications techniques minimales des performances thermiques des bâtiments sont fixées par la RTBM proposée comme suit :

| Zone climatique | Ecoles | Administrations | Hôpitaux | Hôtels |
|---|---|---|---|---|
| **Agadir Z1** | 44 | 45 | 72 | 48 |
| **Tanger Z2** | 50 | 49 | 73 | 52 |
| **Fès Z3** | 61 | 49 | 68 | 66 |
| **Ifrane Z4** | 80 | 35 | 47 | 34 |
| **Marrakech Z5** | 65 | 56 | 92 | 88 |
| **Errachidia Z6** | 67 | 58 | 93 | 88 |

*Tableau 4: Besoins spécifiques thermiques annuels maximaux de chauffage et de climatisation dans le secteur tertiaire en kWh/m²/an*

### II.2.2. Une approche simplifiée dite prescriptive :

Dans ce cas, les spécifications techniques sont exprimées, pour chaque type de bâtiments chaque zone climatique, sous forme de coefficients maximaux de transmission thermique (U en W/m².K) des murs, de la toiture, des fenêtres et des planches bas, en fonction du rapport de la surface des ouvertures vitrées à la surface brute de la façade.


www.cours-genie-civil.com

| | Taux des baies vitrées TGBV | U des toitures exposées (W/m2.K) | U des murs extérieurs (W/m2.k) | U des vitrages (W/m2.) | $R_{min}$ des planchers sur sol (m2.k/W | Facteur Solaire FS* des vitrages |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Zone climatique règlementaire Z1 (Réf. Agadir) | ≤ 15% | ≤ 0,75 | ≤ 1,20 | ≤ 5,80 | NE | NE |
| | 16-25 % | ≤ 0,65 | ≤ 1,20 | ≤ 5,80 | NE | Nord : NE<br>Autres : ≤ 0,7 |
| | 26-35 % | ≤ 0,65 | ≤ 1,20 | ≤ 3,30 | NE | Nord : NE<br>Autres : ≤ 0,5 |
| | 36-45 % | ≤ 0,55 | ≤ 1,20 | ≤ 3,30 | NE | Nord : ≤ 0,7<br>Autres : ≤ 0,3 |
| Zone climatique règlementaire Z2 (Réf. Tanger) | ≤ 15% | ≤ 0,65 | ≤ 0,80 | ≤ 5,80 | NE | NE |
| | 16-25 % | ≤ 0,65 | ≤ 0,80 | ≤ 3,30 | NE | Nord : NE<br>Autres : ≤ 0,7 |
| | 26-35 % | ≤ 0,65 | ≤ 0,60 | ≤ 3,30 | NE | Nord : NE<br>Autres : ≤ 0,5 |
| | 36-45 % | ≤ 0,55 | ≤ 0,60 | ≤ 2,60 | NE | Nord : ≤ 0,7<br>Autres : ≤ 0,3 |
| Zone climatique règlementaire Z3 (Réf. Fès) | ≤ 15% | ≤ 0,65 | ≤ 0,80 | ≤ 3,30 | ≥ 0,75 | NE |
| | 16-25 % | ≤ 0,65 | ≤ 0,80 | ≤ 3,30 | ≥ 0,75 | Nord : NE<br>Autres : ≤ 0,7 |
| | 26-35 % | ≤ 0,55 | ≤ 0,70 | ≤ 2,60 | ≥ 0,75 | Nord : NE<br>Autres : ≤ 0,5 |
| | 36-45 % | ≤ 0,49 | ≤ 0,60 | ≤ 1,90 | ≥ 0,75 | Nord : ≤ 0,7<br>Autres : ≤ 0,5 |
| Zone climatique règlementaire Z4 (Réf. Ifrane) | ≤ 15% | ≤ 0,55 | ≤ 0,60 | ≤ 3,30 | ≥ 1,25 | NE |
| | 16-25 % | ≤ 0,55 | ≤ 0,60 | ≤ 3,30 | ≥ 1,25 | Nord : NE<br>Autres : ≤ 0,7 |
| | 26-35 % | ≤ 0,49 | ≤ 0,60 | ≤ 2,60 | ≥ 1,25 | Nord : ≤ 0,7<br>Autres : ≤ 0,6 |
| | 36-45 % | ≤ 0,49 | ≤ 0,55 | ≤ 1,90 | ≥ 1,25 | Nord : ≤ 0,6<br>Autres : ≤ 0,5 |
| Zone climatique règlementaire Z5 (Réf. Marrakech) | ≤ 15% | ≤ 0,65 | ≤ 0,80 | ≤ 3,30 | ≥ 1,00 | NR |
| | 16-25 % | ≤ 0,65 | ≤ 0,70 | ≤ 3,30 | ≥ 1,00 | Nord : NE<br>Autres : ≤ 0,7 |
| | 26-35 % | ≤ 0,55 | ≤ 0,60 | ≤ 2,60 | ≥ 1,00 | Nord : ≤ 0,6<br>Autres : ≤ 0,4 |
| | 36-45 % | ≤ 0,49 | ≤ 0,55 | ≤ 1,90 | ≥ 1,00 | Nord : ≤ 0,5<br>Autres : ≤ 0,3 |
| Zone climatique règlementaire Z6 (Réf. Errachidia) | ≤ 15% | ≤ 0,65 | ≤ 0,80 | ≤ 3,30 | ≥ 1,00 | NR |
| | 16-25 % | ≤ 0,65 | ≤ 0,70 | ≤ 3,30 | ≥ 1,00 | Nord : NE<br>Autres : ≤ 0,7 |
| | 26-35 % | ≤ 0,55 | ≤ 0,60 | ≤ 2,60 | ≥ 1,00 | Nord : ≤ 0,6<br>Autres : ≤ 0,4 |
| | 36-45 % | ≤ 0,49 | ≤ 0,55 | ≤ 1,90 | ≥ 1,00 | Nord : ≤ 0,5<br>Autres : ≤ 0,3 |

*Tableau 5: Les exigences limites réglementaires des caractéristiques thermiques de l'enveloppe des bâtiments à usage de bureaux*


www.cours-genie-civil.com

# III. Mode d'isolation :

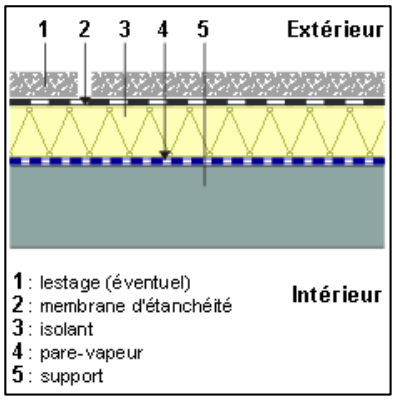
## *III.1. Toiture :*

### III.1.1. La toiture chaude :

La toiture chaude désigne la toiture plate dont l'isolant est placé sur le support sans lame d'air entre les différentes couches.

L'isolant est recouvert par la membrane d'étanchéité, qui le protège. Il reste donc sec et conserve ainsi toutes ses caractéristiques thermiques.

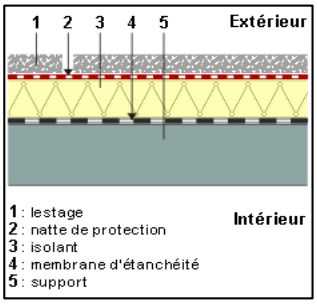
Dans la plupart des cas un écran pare-vapeur doit être interposé entre le support et l'isolant. (En cas de rénovation, il peut s'agir de l'ancienne étanchéité que l'on décide de conserver).




Le lestage n'est pas nécessaire. L'isolant et la membrane peuvent être fixés mécaniquement ou par collage. Il est dans ce cas relativement léger, et peut être appliqué sur des structures existantes qui ne supportent pas une augmentation de charge.

### III.1.2. La toiture inversée :

La toiture chaude inversée désigne la toiture plate dont l'étanchéité est placée sur le support et dont l'isolant est posé sur l'étanchéité. L'isolant est donc mouillé par les eaux pluviales, ce qui diminue ses performances.

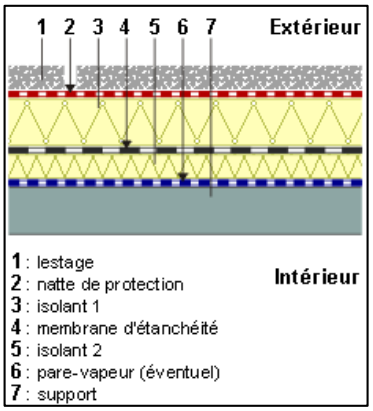



### III.1.3. La toiture combinée :

La toiture combinée consiste en un mélange des techniques "toiture chaude" et "toiture inversée".

L'isolation est mise en place en deux couches :

- La première couche d'isolant est recouverte par la membrane d'étanchéité ;
- La deuxième couche d'isolant est placée sur la membrane d'étanchéité. La technique de la toiture combinée protège ainsi la membrane d'étanchéité contre les chocs thermiques et le rayonnement ultraviolet, et de ce fait, ralentit son vieillissement.




Un écran pare-vapeur est parfois interposé entre le support et l'isolant inférieur. Celui-ci n'est pas nécessaire lorsque la résistance thermique de la couche supérieure est deux fois plus importante que la résistance thermique de la couche inférieure.

Le lestage est nécessaire.

## *III.2. Mur :*

### III.2.1. L'isolation par l'intérieur :

On rencontre principalement :

- Les systèmes à plaques de plâtre ;
- Le système à contre-cloison maçonnée.

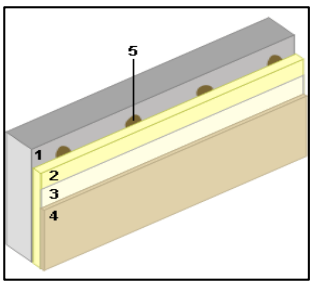
*<u>Les systèmes à plaques de plâtre :</u>*

- *Panneau isolant complexe :*

Le panneau complexe préfabriqué comprend un isolant revêtu d'une plaque de finition. Dans certains panneaux, lors de la fabrication, un pare-vapeur est inséré entre l'isolant et la finition.

**Les panneaux isolants complexes posés par collage**

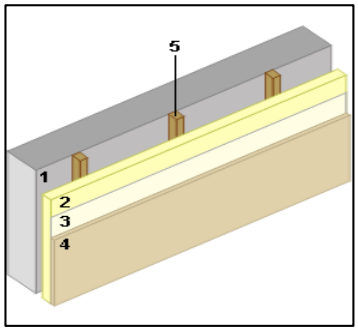
Panneau complexe constitué de :




1. Maçonnerie ;
2. Isolation thermique ;
3. Pare-vapeur éventuel ;
4. Panneau de finition ;
5. Plots de colle.

**Les panneaux isolants complexes posés sur lattage**

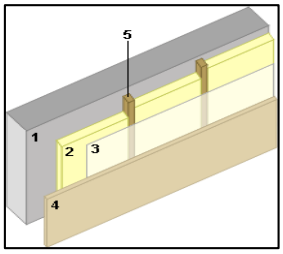
Panneau complexe constitué de :




1. Maçonnerie ;
2. Isolation thermique ;
3. Pare-vapeur éventuel ;
4. Panneau de finition ;
5. Lattes.

En variante à ce système, les fabricants proposent souvent des profilés métalliques à la place des lattes en bois.

- *Les panneaux isolants revêtus sur chantier par des plaques de plâtre :*




1. Maçonnerie ;
2. Isolation thermique ;
3. Pare-vapeur éventuel ;
4. Panneau de finition ;
5. Lattes.

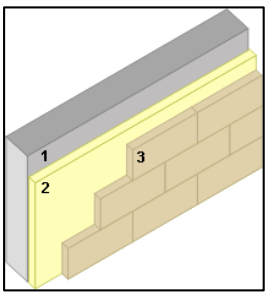
Pour ce système aussi, les fabricants proposent souvent des profilés métalliques à la place des lattes en bois.

*Les isolants derrière contre-cloison maçonnée :*

Une paroi auto-stable est disposée à l'intérieur, parallèlement et à une certaine distance du mur. Les matériaux les plus utilisés sont :

- les briques de terre cuite (briques plâtrières) ;
- les carreaux de plâtre ;
- les blocs de béton ;
- les sandwiches plaques plâtre et âme cartonnée alvéolaire.

L'isolant est incorporé entre la contre-cloison et le mur. Il peut s'agir de polystyrène expansé, de laine minérale semi-rigide ou de polyuréthane expansé.

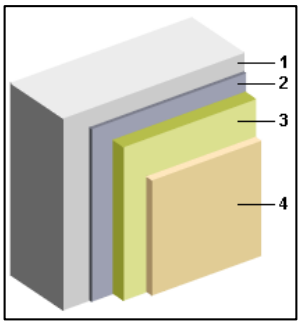



1. Mur ;
2. Isolant ;
3. Carreaux de plâtre.

### III.2.2. L'isolation par l'extérieur :

- *L'enduit isolant*

L'enduit isolant consiste en une couche isolante constituée par un mortier composé de granulés (polystyrène expansé et/ou perlite, ...) et d'un liant de type ciment. Si le mur est très absorbant, un mortier d'accrochage est préalablement projeté sur celui-ci pour assurer une bonne adhérence entre le support et l'enduit isolant. La couche isolante est ensuite recouverte d'une couche de finition le plus souvent à base d'un liant hydraulique.



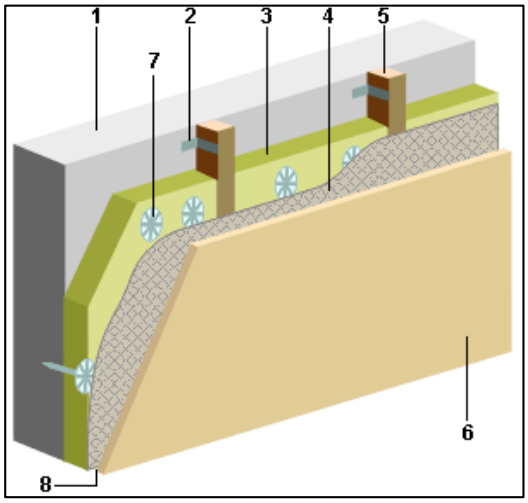

1. Mur plein ;
2. Couche d'accrochage ;
3. Enduit isolant ;
4. Enduit minéral décoratif.

Remarque : Les mortiers constitués de ciment et de billes de polystyrène expansé ou de perlite siliconée ont, en général, une masse volumique comprise entre 200 et 450 kg/m³ et un coefficient de conductivité thermique λ entre 0,07 et 0,12 W/m.K. Dès lors, cette technique nécessite des épaisseurs excessives pour atteindre un coefficient de transmission thermique U acceptable.

- *Les panneaux d'isolation complétés d'une structure supportant l'enduit :*

Cette technique se rapproche de la précédente, mais l'isolant est disposé entre les éléments d'une structure. Cette structure sert de support à l'armature de l'enduit. L'enduit est le plus souvent minéral et est indépendant de l'isolant.

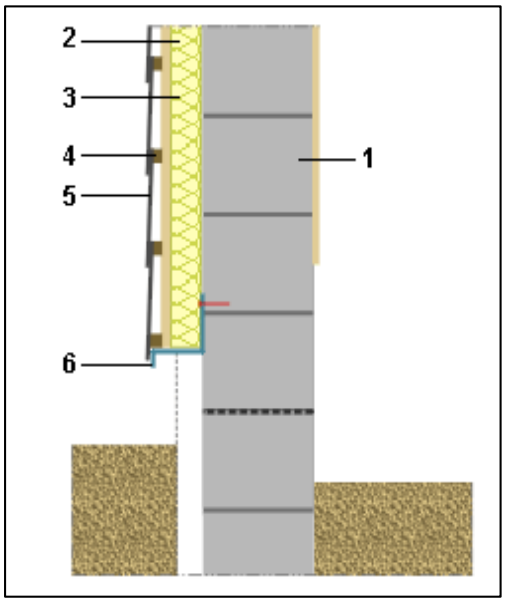
1. Maçonnerie monolithique ou voile de béton + ancien enduit éventuel ;
2. Ancrages ;
3. Isolant thermique ;
4. Armature de l'enduit ;
5. Ossature ;
6. Enduit (sous-couche + finition) ;
7. Fixation de l'isolant ;
8. Lame d'air (ventilée ou non).




- *L'isolation thermique protégée par un bardage :*

Ce système est identique au précédent sauf que l'enduit armé est remplacé par un bardage (ardoise, lamelles métalliques ou plastiques, revêtement en bois, ...) fixé sur l'ossature.

1. Maçonnerie existante ;
2. Structure (bois ou métallique) verticale ou horizontale selon le type de bardage, ayant l'épaisseur de l'isolant ;
3. Isolant thermique posé entre lattes et fixé mécaniquement à la paroi (chevilles) ;
4. Lattage fixé transversalement à la structure ;
5. Bardage (ardoises naturelles ou synthétiques, bois, feuilles métalliques...) ;
6. Bavette pour évacuer les eaux infiltrées vers l'extérieur.

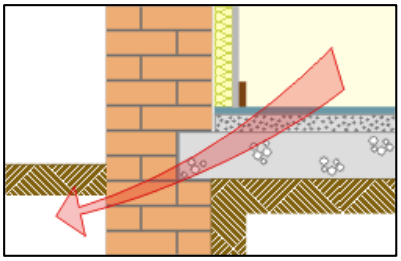



## *III.3. Traitement des ponts thermiques et de condensation:*

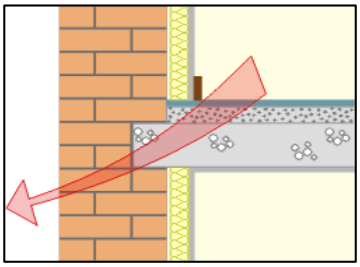
### III.3.1. Cas de l'isolation intérieure :

Le fait même d'apporter une isolation sur la face intérieure des murs de façades va créer des ponts thermiques. Outre des déperditions thermiques, ces ponts thermiques peuvent provoquer de la condensation superficielle ou/et des moisissures.

*Fondation*

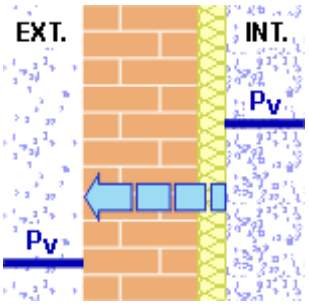
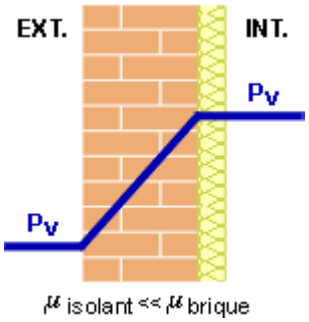
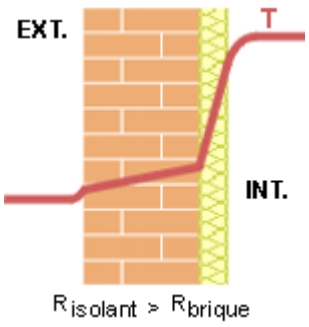


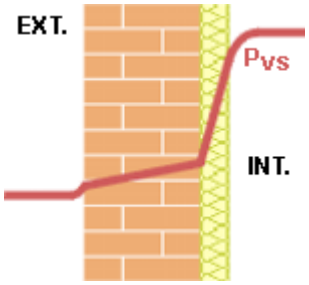
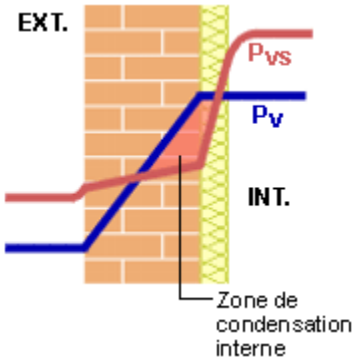
*Appui de plancher*



De ce qui est condensation, Il y a moins de risque de condensation interne lorsque, de l'intérieur vers l'extérieur, les matériaux sont de plus en plus perméables à la vapeur d'eau.
Par contre, le risque de condensation interne est grand lorsque l'isolation par l'intérieur est réalisée avec un matériau isolant perméable à la vapeur (laine minérale par exemple) sans pare-vapeur du côté intérieur ou avec un pare-vapeur mal posé. En effet, de l'intérieur vers l'extérieur, la chute de température (et avec elle, la chute de la pression de saturation) est grande dans l'isolant alors que la pression de vapeur est restée importante. Cette dernière va, à un moment donné, dépasser la pression de saturation : il y a condensation interne.

Pour bien concrétiser le phénomène nous présentons les explications suivantes :

| | |
|---|---|
|  **$P_v$** *: pression de vapeur* | En hiver, la pression de vapeur d'eau de l'air chaud à l'intérieur d'un bâtiment est toujours supérieure à celle de l'air extérieur.<br>La vapeur d'eau diffuse des zones à forte concentration en vapeur d'eau vers les zones à faible concentration en vapeur d'eau : on parle de diffusion de vapeur. La diffusion crée un flux de vapeur à travers la paroi, de l'intérieur, vers l'extérieur. |
|  | La chute de pression dans chacune des différentes couches de matériaux est d'autant plus grande que la résistance à la diffusion de vapeur des couches de matériaux est élevée; en régime stationnaire, elle est en fait directement proportionnelle à cette résistance à la diffusion de vapeur. |
|  | D'autre part, la baisse de température **T** dans les différentes couches de matériaux est d'autant plus grande que la résistance thermique (R) des matériaux est importante. |

| | |
|---|---|
|  | De plus, à chaque température régnant à l'intérieur d'un matériau correspond une pression de vapeur de saturation **Pvs**. |
|  | La condensation interne, se produit si à un endroit d'une couche, la pression de vapeur réelle devient égale à la pression de saturation correspondant à la température régnant à cet endroit.<br><br>**Pv** *: pression de vapeur.*<br>**Pvs** *: pression de vapeur de saturation* |

**Réalisation correcte :**

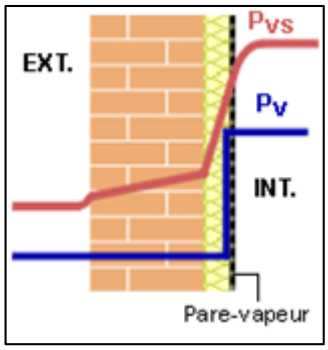
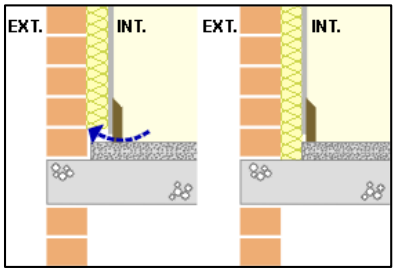



Figure 2: *Réalisation correcte d'une isolation par l'intérieur avec isolant perméable à la vapeur.*




L'utilisation d'un isolant peu ou pas perméable à la vapeur collé sur la maçonnerie , ne nécessite pas l'interposition d'un pare-vapeur pour autant que de l'air intérieur ne puisse circuler entre isolant et maçonnerie. Par contre si ce type d'isolant est mis en œuvre entre lattes, la pose du pare-vapeur reste indispensable. Celui-ci couvre alors l'ensemble du système « isolant + lattes ».
Sur la figure, à gauche, l'air chaud et humide passe sous la plinthe et sous l'isolant discontinu. Il rencontrerait une surface froide et condenserait.

En été, lorsque la maçonnerie d'un mur de façade isolé par l'intérieur, est susceptible d'être humide dans la masse (infiltration d'eau de pluie, humidité ascensionnelle ou même

humidité de construction), il y a, en été, un risque de condensation interne contre le pare-vapeur.
En effet, dans ce cas, en période d'été, la vapeur d'eau provoquée par le séchage de la maçonnerie peut diffuser partiellement vers l'intérieur du bâtiment et donner lieu à la formation de condensation à l'interface isolant/pare-vapeur. Cette condensation provient du fait que, suite à la position de l'isolant, la finition intérieure du mur atteint des températures sensiblement inférieures à celles de la maçonnerie.

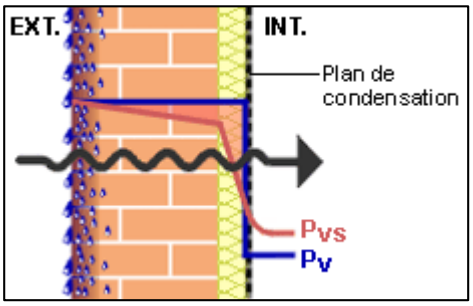


Figure 3: Condensation interne en été.

La présence d'un isolant du côté intérieur du mur de façade diminue l'inertie thermique du bâtiment : le mur de façade isolé par l'intérieur ne peut plus accumuler puis restituer la chaleur (ou la fraîcheur) intérieure. Le local est rapidement chauffé, mais se refroidit tout aussi vite. En été il y a risque de surchauffe. Cependant, les bâtiments avec des parois internes lourdes et épaisses (murs intérieurs, planchers), peuvent conserver une inertie thermique globale suffisante malgré la perte de l'inertie thermique des murs de façade.

### III.3.2. Cas de l'isolation extérieure :

L'isolation extérieure permet d'éviter les risques des ponts thermiques; Elle entraîne des refroidissements et réchauffements moins brutaux du climat intérieur.
L'isolant thermique extérieur suffisamment épais et correctement mis en œuvre permet de supprimer tout risque de condensation superficielle sur la face intérieure du mur. En effet, elle permet, dans la plupart des cas, d'éviter tous les ponts thermiques.

Ce cas d'isolation ne présente pas de risque de condensation interne pour autant que la migration de vapeur puisse se faire normalement de l'intérieur vers l'extérieur. Ce qui peut s'obtenir:

- Soit par une finition extérieure perméable à la vapeur tout en étant imperméable à la pluie ;
- Soit par une lame d'air ventilée entre l'isolant et la finition extérieure ;
- Soit dans le cas d'un revêtement extérieur imperméable à la vapeur, en plaçant un pare-vapeur sur la face intérieure du mur ou du côté chaud de l'isolant.

Le placement de l'isolant du côté extérieur de la maçonnerie réduit très fortement les variations de température au sein de la maçonnerie. En effet, celles-ci restent très proches des températures intérieures relativement constantes par rapport aux températures extérieures. Ce qui supprime pratiquement les risques de fissurations d'origine thermique de la maçonnerie.

## C) A propos du traitement acoustique :

### I. Le son :

Le son est une sensation auditive produite par une variation rapide de la pression de l'air. L'origine de cette variation est typiquement la vibration d'un corps (enceinte, cordes vocales, etc.) qui agite les molécules d'air environnantes. Ainsi est créé une succession de zones de pression et de dépression qui constitue l'onde acoustique. Quand cette onde, transmise par les molécules adjacentes, arrive à l'oreille, elle fait vibrer le tympan : le son est alors perçu. La vitesse de propagation dans l'air est de 340 m/s.

Le son se caractérise par :

**- sa fréquence :** Ce nombre d'oscillations par seconde définit la fréquence ou hauteur d'un son et s'exprime en Hertz (Hz). On distingue trois types de fréquences : basse (sons graves), médium (sons moyens), haute (sons aigus).

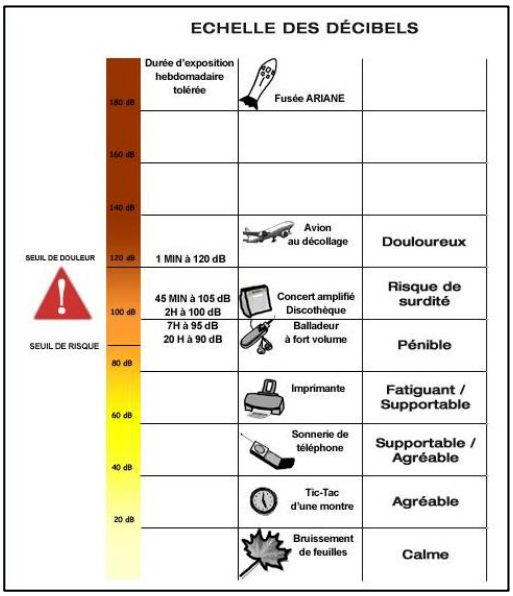
**- sa pression acoustique (niveau sonore) :** Le niveau sonore d'un son est défini par le rapport de la pression acoustique à une pression de référence qui correspond au seuil minimum audible par l'oreille humaine. Il se mesure en décibel (dB) et permet de distinguer les sons forts des sons faibles.

L'oreille humaine ne perçoit que les sons dont la fréquence est comprise entre : 20 Hz et 20000 Hertz

### II. Le décibel :

La pression acoustique est mesurée en Pascals (Pa). L'oreille est sensible à des pressions allant de 0,00002 Pa à 20 Pa, soit un rapport de 1 à 1.000.000. Pour ramener cette large échelle de pression, exprimée en Pascals, à une échelle plus réduite et donc plus pratique d'utilisation, on adopte la notation logarithmique et donc le décibel (dB).

L'oreille humaine perçoit les sons de 0 à 130 dB, seuil de la douleur.




### III. Le bruit :

#### *III.1. Définition et caractéristiques :*

Le bruit est un mélange de sons différents, ayant chacun sa fréquence et son niveau sonore. Pour l'analyser, il faut évaluer le niveau sonore à chacune des fréquences qui composent ce bruit. Cette analyse permet d'identifier la prépondérance de composantes en fréquences graves, médiums ou aiguës.

Dans le domaine du bâtiment, il n'est pas nécessaire d'effectuer une analyse extrêmement fine du niveau de pression acoustique pour toute la gamme de fréquences. En effet, la réglementation ne prend en compte que les fréquences de 100 à 5.000 Hz regroupées en six bandes d'octave centrées sur 125, 250, 500, 1.000, 2.000 et 4.000 Hz.

### III.2. Bruits normalisés :

Pour permettre une comparaison directe entre toutes les mesures, les pouvoirs publics ont défini des spectres de bruit d'émission standard, le bruit rose, le bruit route et le bruit d'impact.

**- Le bruit rose** simule les bruits aériens émis dans le bâtiment et il est également utilisé pour représenter les bruits d'avions. Il est caractérisé par un niveau sonore de 80 dB par octave.

**- Le bruit route** simule les bruits aériens émis par le trafic routier. Il est plus riche en sons graves que le bruit rose.

**- Le bruit d'impact** normalisé est produit par une machine à chocs qui comprend cinq marteaux de 500 g tombant de 4 cm au rythme de 10 coups par seconde.

### III.3. Transmission d'un bruit aérien à travers une paroi :

Lorsqu'une onde sonore rencontre une paroi, son énergie incidente est divisée en trois parties :

1. l'énergie transmise qui traverse la paroi ;
2. l'énergie absorbée par la paroi et dissipée en chaleur ;
3. l'énergie réfléchie vers le local d'origine.

**L'isolation acoustique** traite de l'énergie transmise par la paroi. Cette énergie est pratiquement indépendante du caractère plus ou moins absorbant des parements. Les parties absorbées et réfléchies sont du domaine de **la correction acoustique.**

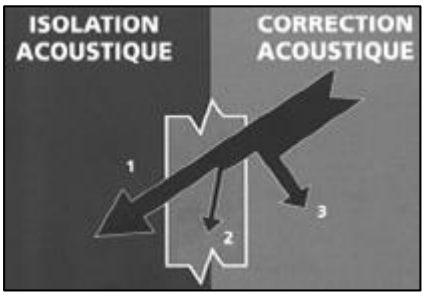



*Figure 4: Energie acoustique : 1 transmise – 2 absorbée – 3 réfléchie*

### III.4. Les différents bruits dans le bâtiment :

On distingue quatre types de bruit :

- **Les bruits aériens intérieurs** qui sont émis dans un local et qui se propagent dans l'air (chaîne hi-fi, télévision, conversation forte...) ;
- **Les bruits aériens extérieurs** qui sont émis à l'extérieur de l'immeuble et qui se propagent dans l'air (circulation, trains, avions...) ;
- **Les bruits d'impact** qui sont émis par une paroi mise en vibration (pas, chutes ou déplacement d'objets...) ;
- **Les bruits d'équipements** qui sont émis par les appareils et installations situés soit dans le logement récepteur (machine à laver, chauffe-eau...) soit hors du logement récepteur (ascenseurs, tuyauteries, ventilation...).

# CHAPITRE 3 : MODÉLISATION DE LA STRUCTURE ÉTUDIÉE

## I. Solution retenue :

Nous avons une tenue au feu de 2 heures pour les étages courants et 4h pour le sous-sol vu qu'il contient des parkings, nous optons donc pour des diamètres minimaux des poteaux D = 34cm pour les poteaux des étages et D = 51cm pour le sous-sol.

Pour les voiles, nous optons pour des épaisseurs minimales de 15 cm et un enrobage de 4 cm pour les étages courants, et 25 cm d'épaisseur et 7 cm d'enrobage pour le sous-sol.

Pour les planchers, nous optons pour 11cm d'épaisseur minimale avec 2,5cm d'enrobage pour les étages et 17,5cm d'épaisseur avec 4,5cm d'enrobage pour le sous-sol.

Vu que le noyau central présente un nombre de murs qui peut, à lui seul, assurer le contreventement de notre structure, Nous choisissons comme système de contreventement celui du noyau central. Les poteaux seront donc calculés en statique.

Le cas de notre structure (vu son usage de bureaux) présente des portées entre axe arrivant jusqu'à 8,45m. De surcroît, la hauteur permise pour les poutres en présence de faux plafond ne dépasse pas 60 cm ce qui donnera des retombées de poutres apparentes.

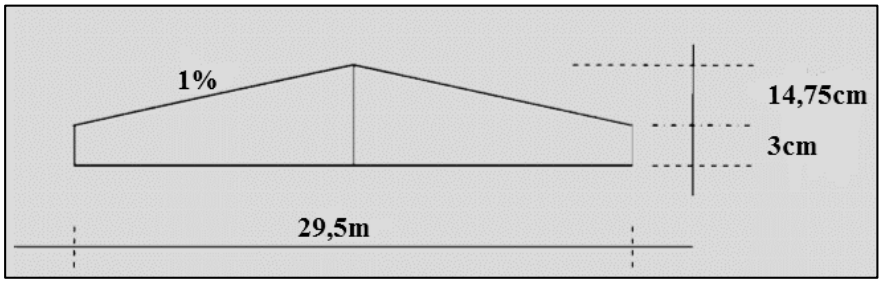
Pour répondre à ces exigences tout en restant dans une marge économique raisonnable, nous avons opté pour le choix des dalles champignons constituées par une dalle pleine dont l'épaisseur est déterminée dans ce qui suit. Les piliers sont pourvus en partie supérieure, à chaque étage, de chapiteaux en forme de troncs de pyramide renversés faisant un angle de 45° avec le plan horizontal.

## II. Hypothèses de calcul :

### *II.1. Charges permanentes :*

Les charges permanentes sont obtenues à partir de la norme NF P06-004.

Après avoir déterminé les points de chute, la forme de pente de la terrasse non accessible est déterminée comme suit :
Nous considérons une diagonale de 29,5 cm et une pente de 1%, nous obtenons donc une hauteur moyenne de $3 + \frac{14,75}{2} = 10,37\ cm$.
La charge attribuée à la forme de pente dans la norme est 20 kg/m², ce qui donne une charge de 22 kg/m².



Nous récapitulons les résultats obtenus dans le tableau suivant :

| Niveau | Elément | Charge (kg/m²) |
|---|---|---|
| Terrasse non accessible | Etanchéité multicouche (2 cm) | 12 |
| | Protection de l'étanchéité par gravillon (5 cm) | 100 |
| | Isolation thermique en liège (5 cm) | 21 |
| | Forme de pente | 228 |
| | **TOTAL** | **361** |
| Terrasse accessible | Sur toiture en dalle préfabriquée BA blanc lavé (3 cm) | 75 |
| | Etanchéité multicouche (2 cm) | 12 |
| | Forme de pente | 197 |
| | Revêtement Sol : Bois composite | 25 |
| | **TOTAL** | **309** |
| Etage courant | Faux plancher technique (60 x 60) | 20 |
| | Revêtement Sol : Dalle moquette | 8 |
| | Faux plafond (2 cm) | 20 |
| | Murs en maçonnerie (10 cm) | 90 |
| | **TOTAL** | **138** |
| RDC | Revêtement en carrelage | 60 |
| | Faux plafond (2 cm) | 20 |
| | Murs en agglos (15 cm) | 205 |
| | **TOTAL** | **285** |
| SS | Chappe incorporées (3 cm) | 60 |
| | Murs en agglos (15 cm) | 205 |
| | Faux plafond (2 cm) | 20 |
| | **TOTAL** | **285** |

*Tableau 6: Charges permanentes*

### *II.2. Charges d'exploitation :*

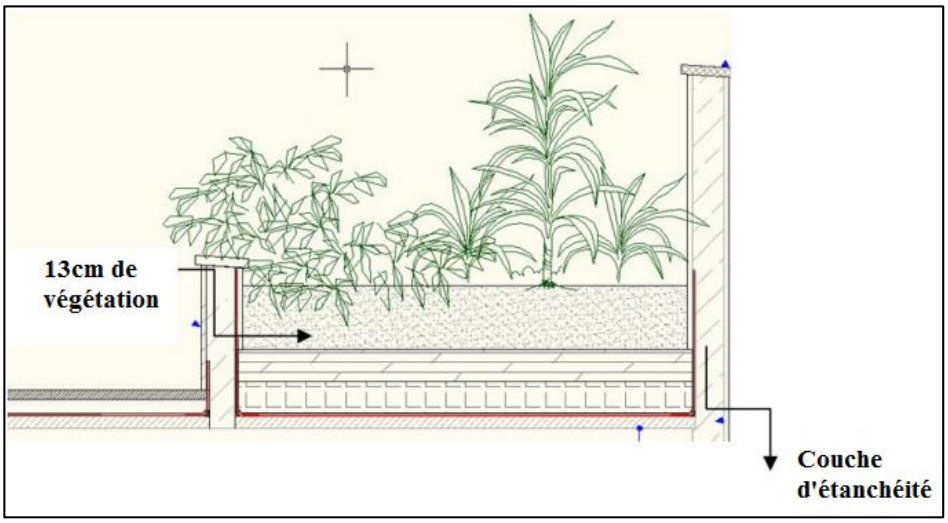
Les charges d'exploitation sont obtenues à partir de la norme NF P06-001 :

| Niveau | Charge (Kg/m²)° |
|---|---|
| Bureaux paysagers | 350 |
| Mezzanine et magasins | 500 |
| Parking | 250 |
| Terrasse accessible | 150 |
| Terrasse non accessible | 100 |
| Balcon | 450 |

*Tableau 7: Charges d'exploitation*

## II.3. Autres charges :

### II.3.1. Charges surfaciques :




| Elément | G (kg/m²) | Q (kg/m²) |
|---|---|---|
| Végétation (13 cm + 1 cm d'étanchéité) | 360 | 100 |
| Escaliers et ascenseur | --- | 250 |

*Tableau 8: Charges surfaciques*

### II.3.2. Charges linéaires :

Les allèges sont en béton armé et ont une épaisseur de 0,2 m alors que la façade se compose d'un double vitrage couvrant toute la hauteur de l'étage.

| Niveau | Epaisseur Allège(m) | Hauteur Allège(m) | Epaisseur Vitrage(m) | Hauteur Vitrage(m) | Charge (kg/ml) |
|---|---|---|---|---|---|
| Etage courant (3,5 m) | 0,2 | 0,8 | 0,014 | 3,5 | 523 |
| Etage courant (4,2 m) | 0,2 | 0,8 | 0,014 | 4,2 | 547 |
| RDC (3,97 m) | --- | --- | 0,014 | 3,97 | 139 |
| Terrasse | 0,2 | 0,4 | --- | --- | 200 |

*Tableau 9: Charges linéaires*

## II.4. Sol d'assise - Fondations :

Le rapport géotechnique effectué par le laboratoire LPEE montre qu'une vingtaine de sondages ont été réalisés avec des profondeurs allant jusqu'à 50m, ces sondages carottés ont été effectués avec essais pressiométriques.

Tous les sondages montrent qu'on a une coupe homogène avec un remblai qui surmonte le substratum en schiste. L'épaisseur du remblai est variable de 3à 8m. Cette variation est due surtout aux toits des sondages qui se trouvent à des côtes très variables. En effet, si on relève la côte du substratum par rapport au NGM, on trouve le rocher à un niveau pratiquement constant avec un léger pendage vers la mer.


www.cours-genie-civil.com

Les remblais sont hétérogènes et ont été mis en place par déversement, ce qui témoigne de leurs faibles caractéristiques pressiométriques. Par contre les schistes en place ont de très bonnes caractéristiques avec P = 8 bars.
Compte tenu de la présence de sous-sols, le laboratoire conseille de faire un terrassement généralisé jusqu'au toit du rocher. Tous les remblais sont à enlever. Le rattrapage des niveaux bas se fera par la mise en place d'un ballast concassé 30/60mm ayant un Los Angeles inférieur à 35.

Le sol de fondation est rocheux ; il est peu déformable vis-à-vis de la structure. Nous considérons donc que l'ouvrage que l'on cherche à dimensionner est parfaitement encastré dans le sol.

Deux types de fondations sont retenus :

- Radier sous le noyau et dans ce cas il peut reposer soit sur le rocher soit sur le ballast de rattrapage et on optera pour des taux élevé de 8 bars pour les deux cas ;
- Fondations superficielles travaillant aussi à 8 bars reposant sur le rocher. Les tassements dans les deux cas restent faibles et inférieurs au cm et donc on pourra prendre comme module 8 bars/cm.

## III. Prédimensionnement des éléments de structure :

### *III.1. Dalle :*

#### III.1.1. Résistance à la flexion :

L'épaisseur de la dalle est obtenue comme suit :

$$\frac{L}{35} \leq e \leq \frac{L}{30} \qquad \textit{Équation 1}$$

*L* étant la petite portée du panneau le plus sollicité, dans notre cas, le panneau le plus sollicité a une portée égale à : L =7,45m

Donc on a : $22\ cm \leq e \leq 25\ cm$

Nous opterons donc pour une épaisseur des dalles **de 25 cm** et nous tenons à vérifier la condition de la flèche surtout au niveau des portes à faux.

#### III.1.2. Condition de flèche :

Nous devons vérifier les conditions suivantes (*BAEL 91, Article B.6.5, 3*) :

- $f_{max} < L_{max} / 500$ ; si la portée *L* est au plus égale à 5 m ;
- $f_{max} < 0.5$ cm + $L_{max} / 1000$ ; si la portée *L* est supérieur à 5 m.

Dans notre cas : $L_{max}$ = 745 cm, donc on doit vérifier que $f_{max} < 1{,}245$ cm.

Or : $fmax = \frac{5qL^4}{384\ EI} \leq 0{,}5\ cm + \frac{L}{1000}$ avec: E = 32164, 195 MPa

La condition de flèche est donc vérifiée pour l'épaisseur e = 25 cm.


LAHSAINI HANAE www.cours-genie-civil.com BAKHARI MOHAMMED

Pour les parties en portes à faux nous avons :

- $f_{max} < L_{max} / 250$ ; si la portée $L$ de la console est au plus égale à 2 m.
- Pour les consoles dont les portées dépassent 2 m la norme ne précise pas de condition limite.

Nous sommes donc amenés à déterminer la flèche au niveau de différentes portes à faux. Les résultats obtenus sont présentés en annexe.
Les flèches obtenues sont tolérables pour l'épaisseur déjà considérée.

### *III.2. Poteaux :*

Le prédimensionnement des poteaux est obtenu à partir de la relation suivante :

$$\pi R^2 \leq \frac{Nu}{\sigma bc} \qquad \textit{Équation 2}$$

Nous optons pour un béton de résistance de 30 MPa.

Nous notons que les efforts $N_u$ sont donnés par le logiciel CBS.

Nous récapitulons les résultats obtenus dans le tableau suivant (l'annexe contient le détail de calcul) :

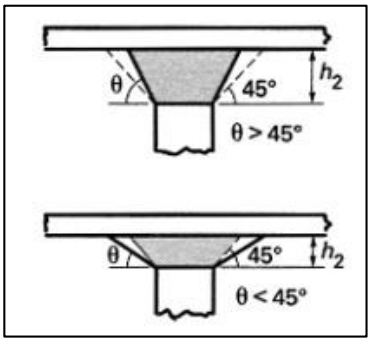
| Niveau | Diamètre Final (cm) |
|---|---|
| Etage 14 | **40** |
| Etage 13 | **40** |
| Etage 12 | **45** |
| Etage 11 | **50** |
| Etage 10 | **55** |
| Etage 9 | **60** |
| Etage 8 | **65** |
| Etage 7 | **65** |
| Etage 6 | **70** |
| Etage 5 | **75** |
| Etage 4 | **80** |
| Etage 3 (Bureau) | **85** |
| Etage 3 (Terrasse) | **65** |
| Etage 2 (Sous Bureau) | **90** |
| Etage 2 (Sous Terrasse) | **75** |
| Etage 1 (Sous Bureau) | **90** |
| Etage 1 (Sous Terrasse) | **80** |
| RDC (Sous Bureau) | **95** |
| RDC (Sous Terrasse) | **80** |
| SS (Sous Bureau) | **100** |
| SS (Sous Terrasse) | **85** |

*Tableau 10: Diamètres des poteaux*


www.cours-genie-civil.com

### III.3. Chapiteaux :

Nous optons pour des chapiteaux carrés de côté a' en tronc de pyramide dont la petite base est la section supérieure de la partie prismatique du pilier.




Les dimensions des chapiteaux doivent vérifier la condition suivante mentionnée dans le *BAEL91, Article E.4.0, 3* :

$$a' \leq 0{,}4 * l \qquad \text{Équation 3}$$

$l$ Étant la plus petite dimension de celui des quatre panneaux entourant le pilier considéré.

Le prédimensionnement de ces chapiteaux doit répondre aux conditions de vérification de la résistance de la dalle au poinçonnement par effort tranchant.

- Vérification de poinçonnement par effort tranchant :

Aucune armature d'effort tranchant n'est requise si la condition suivante est satisfaite :

$$Qu \leq 0{,}045 * Uc * h * \frac{fc28}{\gamma b} \qquad \text{Équation 4}$$

Où :

- $Qu$ la charge de calcul vis-à-vis de l'état limite ultime ;
- h l'épaisseur de la dalle ;
- $Uc$ le périmètre du contour du feuillet moyen $Uc = \pi(D + h + h_2)$.

Nous considérons le cas du poteau le plus chargé et nous obtenons une charge de $Qu = 60\ T$ ce qui donne une hauteur de chapiteau $h_2 = 20\ cm$.

Toujours pour ne pas disposer d'armatures d'effort tranchant, la contrainte tangente est limitée par une contrainte maximale (article A.5.2, 2):

$$\tau u = \frac{V}{a\prime d} \leq 0{,}07\ \frac{fc28}{\gamma b} \qquad \text{Équation 5}$$

L'effort tranchant maximal développé au niveau de l'appui est de l'ordre de 68 T.m.

Nous obtenons donc une dimension a' = 0,93 m.

Dans les calculs qui suivront les chapiteaux ont pour côté a' = 2 m.

### III.4. Voile de contreventement :

L'épaisseur minimale du voile est fonction de la hauteur nette $h_e$ de l'étage.

- $e_{min}$ = min (15 cm, $h_e$ / 20) pour un voile non rigidifié à ses deux extrémités ;
- $e_{min}$ = min (15 cm, $h_e$ / 22) pour un voile rigidifié à une extrémité ;
- $e_{min}$ = min (15 cm, $h_e$ / 25) pour un voile rigidifié à ses deux extrémités.

La majorité des voiles sont non rigidifiés, nous obtenons donc les résultats suivants :

| Etage | Hauteur(m) | Epaisseur(m) |
|---|---|---|
| Etage courant (3,5 m) | 3,5 | 0,2 |
| Etage courant (4,2 m) | 4,2 | 0,2 |
| RDC | 3,97 | 0,2 |
| Sous-sol | 3,45 | 0,25 |

*Tableau 11: Epaisseur des voiles*

Remarque : Les ouvertures dans les murs porteurs nécessitent la création de linteaux et doivent être rangées en file verticale et régulièrement espacées. On doit aussi prévoir des éléments ferraillés autour des ouvertures, conçus pour compenser la résistance des parties évidées.

## IV. Modélisation :

La modélisation est une approche de la conception du bâtiment qui se caractérise par la création et l'utilisation de données calculables. Elle consiste à construire un modèle approché de la réalité pour simuler le comportement du bâtiment vis-à-vis des charges extérieures. La structure est analysée au moyen d'un modèle spatial, en général, qui peut tenir compte des couplages des degrés de liberté et des propriétés dynamiques réelles de la structure.

En général, deux méthodes de modélisation peuvent être adoptées selon la précision des résultats souhaitée et les logiciels de calcul disponibles :

- Modélisation par la méthode des éléments finis ;
- Modélisation de type brochette à masse concentrée et raideur équivalente.

### *IV.1. Choix de la méthode :*

Le modèle EF (éléments finis) s'avère le plus adapté à notre structure parce que d'abord notre structure est irrégulière et ensuite il s'agit d'une approche qui donne des résultats plus proches de la réalité puisqu'elle permet une bonne évaluation des efforts sismiques et la détection des modes de torsion éventuelles, chose qu'on ne peut pas faire avec le simple modèle brochette.

L'approche de l'analyse spectrale est basée sur la détermination de la réponse maximale de la structure pour chacun de ses modes propres. La technique des modes normaux dite *méthode modale* est la plus utilisée en régime linéaire.

La réponse maximale de la structure est alors donnée comme une combinaison des réponses des modes propres dominants.

L'analyse modale spectrale est reconnue comme méthode de référence permettant d'étudier le comportement d'une structure soumise à l'action d'un séisme. Elle permet de calculer efficacement les valeurs maximales probables de toutes les variables d'intérêt (déplacements, accélérations, réactions, sollicitations, etc.), en déterminant la réponse maximale de chacun des modes propres, et en superposant ces réponses modales par combinaison quadratique

complète (CQC). Cette méthode est utilisée par tous les logiciels d'analyse de structures traitant le calcul sismique.

### *IV.2. Etapes de la modélisation :*

La modélisation de notre structure a été faite en suivant les étapes ci-dessous :

- Modélisation de la structure sur CBS, saisie des données géométriques et des chargements statiques ;
- Calcul statique (descente de charges) effectué sur CBS ;
- Export de la structure vers RSA ;
- Maillage automatique sur RSA ;
- Calcul dynamique effectué sur RSA.

### *IV.3. Modèle CBS :*

Le logiciel CBS présente trois méthodes de calcul :

- **Surface d'influence :** Cette méthode convient surtout aux bâtiments réguliers avec des dalles de type rectangulaires. Les dalles sont divisées en zones d'influence selon leur type.
- **Éléments finis partiels :** Dans cette méthode, les calculs sont effectués par EF pour les dalles seulement, elle convient aux formes de dalles quelconques.
- **Méthode globale :** elle traduit le comportement réel du bâtiment, elle consiste à créer un modèle en éléments finis MEF complet. De plus, cette méthode est indispensable pour les structures irrégulières.

Après l'introduction de tous les coefficients nécessaires, on effectue le calcul statique pour avoir la descente de charges sur les voiles et les poteaux et ainsi pouvoir faire un prédimensionnement de ces éléments de structure.

### *IV.4. Maillage de la structure :*

Le maillage de la structure se fait automatiquement sur le logiciel Robot, dans un premier temps selon la méthode de DELAUNAY qui contrairement à la méthode de COONS, est plus adaptée à notre structure vu son irrégularité.

Le maillage automatique obtenu est dense, il est donc incohérent. Il est alors nécessaire de l'alléger pour pouvoir obtenir un maillage cohérent.

### *IV.5. Combinaisons de calcul :*

Les combinaisons sont générées automatiquement par le logiciel Robot Structural Analysis (RSA), la comparaison vent/ séisme a montré que l'effet du séisme est le plus prépondérant ; les combinaisons dimensionnant notre structure est celle du séisme.

# CHAPITRE 4 : CALCUL DE L'ACTION DU VENT ET DU SÉISME

## I. Calcul de l'effet du vent :

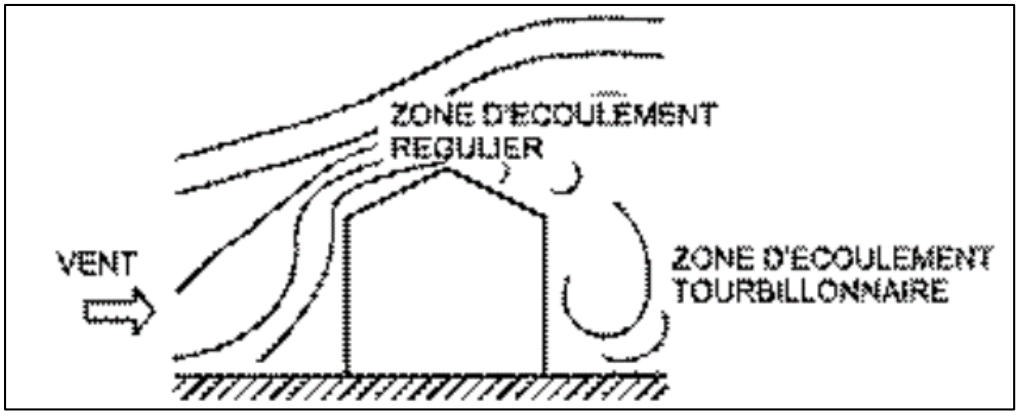
Les actions du vent varient en fonction du temps et s'appliquent directement sur les surfaces extérieures des constructions fermées et, du fait de la porosité de la surface extérieure, agissent également indirectement sur les surfaces intérieures. Les pressions qui s'exercent sur les éléments de la surface engendrent des forces perpendiculaires à la surface de la construction ou des éléments de façade. Par ailleurs, lorsque le vent balaye de larges surfaces de la construction, des forces de frottement non négligeables peuvent se développer tangentiellement à la surface. D'où la nécessité d'un calcul de vent dont les charges sont définies suivant la NV65.

### *I.1. Hypothèses générales :*

#### I.1.1. Direction du vent :

Dans les couches inférieures de l'atmosphère, les grands courants aériens suivent les mouvements du terrain et sont par conséquent parallèles au sol mais il est difficile a priori de définir leur direction en un lieu donné pour un bâtiment donné. L'attention est cependant attirée sur le fait que, lorsque la pente du terrain est forte ou règne sur une grande longueur, il est alors préférable de procéder à une étude expérimentale sur maquette du terrain et de la construction pour déterminer l'allure générale de l'écoulement de l'air.

Pour le calcul des constructions, on suppose que la direction d'ensemble moyenne du vent est horizontale.
Nos calculs porteront sur les deux sens X et Y.




#### I.1.2. Exposition des surfaces :

Si on éclaire la construction par un faisceau de rayons lumineux parallèles à la direction d'ensemble du vent :

- Les surfaces éclairées (exposées au vent) sont dites « au vent » ;
- Les surfaces non éclairées (non exposées au vent) ou sous incidence rasante (parallèles à la direction du vent) sont dites « sous le vent ».

#### I.1.3. Pression dynamique :

La pression dynamique de base $q_{10}$ (daN/m²) est donnée en fonction de la vitesse V du vent en mètres par seconde par la formule :

$$q_{10} = \frac{V^2}{16,3} \qquad \text{Équation 6}$$

Cette pression s'exerce conventionnellement à une hauteur de 10 m.

On doit envisager dans les calculs une pression dynamique normale (les sollicitations engendrées ne doivent pas causer de dommages aux constructions) et une pression dynamique extrême (les sollicitations engendrées ne doivent pas mettre la construction ou une partie de celle-ci « hors service ») dont les valeurs varient selon les zones ; notre bâtiment se situe dans la zone 1 :

| | Pression dynamique de base normale (daN/m²) | Pression dynamique de base extrême (daN/m²) |
|---|---|---|
| ***Zone 1*** | ***53,5*** | ***93,63*** |
| Zone 2 | 68 | 119 |
| Zone 3 | 135 | 236,25 |

*Tableau 12: Valeurs des pressions dynamiques*

### *I.2. Modification des pressions dynamiques de base :*

#### a. Effet de la hauteur au-dessus du sol :

Pour *H* compris entre 0 et 500 m, le rapport entre $q_h$ et $q_{10}$ est défini par la formule :

$$\boldsymbol{Kh = \frac{qh}{q10} = 2,5\frac{H+18}{H+60}} \qquad \text{Équation 7}$$

La hauteur *H* est comptée à partir du sol environnant supposé sensiblement horizontal.
Pour les constructions en bordure immédiate du littoral (c'est le cas de notre immeuble), on adopte une pression constante entre 0 et 10 m égale à celle régnant à 10 m.

#### I.2.1. Effet de site :

Nous tenons compte de la nature du site d'implantation de la construction en multipliant la pression de base par un coefficient de site ks égal à :

| | **Zone 1** | **Zone 2** | **Zone 3** |
|---|---|---|---|
| **Site protégé** | 0,80 | 0,80 | 0,80 |
| **Site normal** | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| **Site exposé** | ***1,35*** | 1,30 | 1,25 |

*Tableau 13: Coefficient de site*

Notre structure se situe sur le littoral, il s'agit donc d'un **site exposé**.

### I.2.2. Effet de masque :

L'effet de masque est appliqué lorsqu'une construction est masquée partiellement ou totalement par d'autres constructions ayant une grande probabilité de durée. Il se traduit soit par une aggravation des actions du vent (lorsque la construction est située dans la zone de turbulence) , soit par une réduction des actions du vent dans les autres cas. Pour notre cas Km=1.

### I.2.3. Effet de dimensions :

L'action du vent s'exerçant sur une paroi n'est pas uniforme en raison des tourbillons locaux ; plus la surface est grande plus cette action est faible. On tient pour cette raison compte de ce phénomène par l'utilisation du coefficient δ dit coefficient de réduction des pressions dynamiques.

A partir de la norme NV65 nous présentons ci-dessous les coefficients tenus en compte dans les calculs ; nous gardons une valeur constante de 0,75 pour les hauteurs inférieures à 30 m

puis un chagement linéaire jusqu'à atteindre la valeur maximale de 0,85 :

Nous faisons le calcul pour les différents étages et nous obtenons les résultats suivants (le détail des calcul est en annexe) :

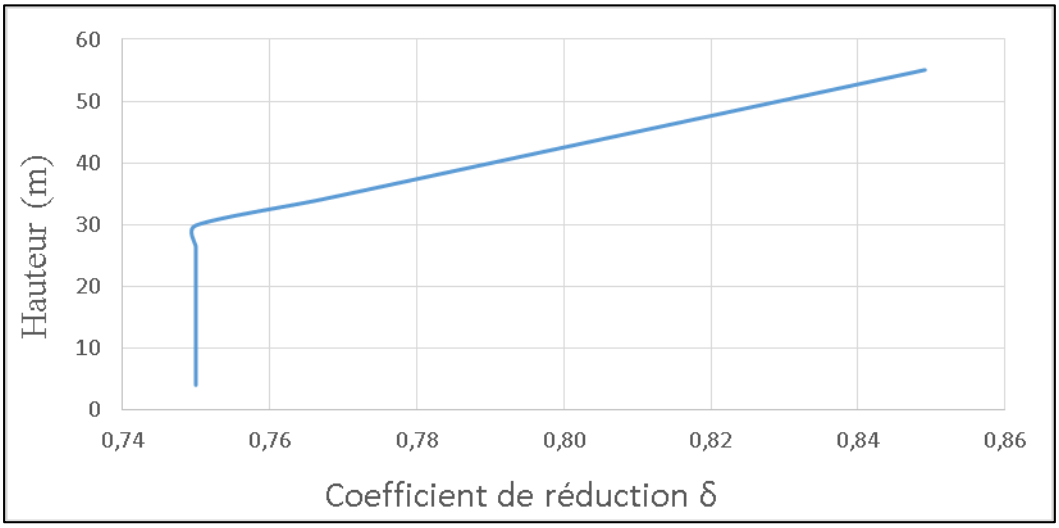



*Figure 5: Diagramme de coefficient de réduction*

| | MAX (daN/m²) | MIN (daN/m²) |
|---|---|---|
| Pression dynamique normale calculée | ***97,36*** | ***46,51*** |
| Pression dynamique normale limite | 170 | 30 |
| Pression dynamique extrême calculée | ***170,38*** | ***81,40*** |
| Pression dynamique extrême limite | 297,5 | 52,5 |

*Tableau 14: Valeurs limites de pression dynamique*

les seuils exigés par la norme sont vérifiée.

## I.3. Action dynamique du vent :

Les effets dynamiques dépendent des caractéristiques mécaniques et aérodynamiques de la construction. Ces actions dynamiques dépendent entre autres de la fréquence propre fondamentale de vibration de la construction.

### I.3.1. Actions parallèles à la direction du vent :

Pour tenir compte de l'effet des actions parallèles à la direction du vent, les pressions dynamiques normales servant au calcul de l'action d'ensemble, sont multipliées à chaque niveau par un coefficient de majoration au moins égal à l'unité. Ce coefficient β est donné par les formules suivantes :

$$\beta = \theta(1 + \xi\,\tau) \qquad \text{Pour le vent normal} \qquad \textit{Équation 8}$$

$$\beta = \theta(0{,}5 + \frac{\theta}{2})(1 + \xi\,\tau) \qquad \text{Pour le vent extrême}$$

avec :

- ξ coefficient de réponse, donné en fonction de la période T du mode fondamental d'oscillation et pour des ouvrages de divers degrés d'amortissement, par le diagramme de la figure suivante :

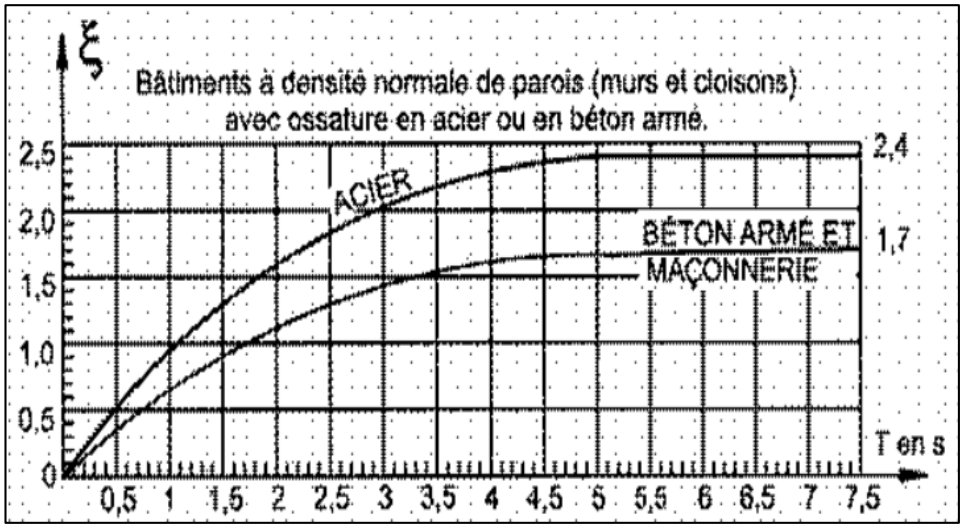



*Figure 6: Coefficient de réponse*

- $\boldsymbol{\tau}$ coefficient de pulsation, est déterminé à chaque niveau considéré en fonction de sa cote H au-dessus du sol.

- **θ** coefficient global dépendant du type de construction, est défini ci-après :

- Pour les constructions prismatiques à base polygonale régulière ou circulaire à l'exception des constructions à usage d'habitation ou de bureau et pour les ensembles prismatiques des constructions ajourées et des constructions en treillis, θ est pris égal à 1 ;
- Pour les autres constructions, θ est donné en fonction de la cote Hs de leur sommet par :
  - 0,70 pour Hs ≤ 30 m ;
  - 0,70 + 0,01 (Hs - 30) pour 30 m < Hs < 60 m ;
  - 1 pour Hs ≥ 60 m.

**- La période fondmentale :**

Pour une structure contreventée par voiles de béton armé la période fondamentale est définie par la formule suivante :

$$T = 0{,}08 * \frac{H}{\sqrt{L}} * \sqrt{\frac{H}{L+H}} \qquad \text{Équation 9}$$

- H étant la hauteur du bâtiment en mètre ;
- L étant la longeur du bâtiment parallèle au vent en mètre.

Nous obtenons donc les résultats suivants :

| | L (m) | H (m) | T (s) | ξ |
|---|---|---|---|---|
| Sens X | 29,40 | 55,07 | 0,66 | 0,45 |
| Sens Y | 55,75 | 55,07 | 0,42 | 0,3 |

*Tableau 15: Période et Coefficient de réponse*

| Niveau | H (m) | Θ | τ | β normale | | β extrême | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | **βx** | **βy** | **βx** | **βy** |
| PH RDC | 3,97 | 0,9507 | 0,3600 | 1,1047 | 1,0534 | 1,0775 | 1,0274 |
| PH 1 | 7,47 | 0,9507 | 0,3600 | 1,1047 | 1,0534 | 1,0775 | 1,0274 |
| PH 2 | 10,97 | 0,9507 | 0,3590 | 1,1043 | 1,0531 | 1,0771 | 1,0271 |
| PH 3 | 15,17 | 0,9507 | 0,3530 | 1,1017 | 1,0514 | 1,0746 | 1,0255 |
| PH 4 | 18,67 | 0,9507 | 0,3480 | 1,0996 | 1,0500 | 1,0725 | 1,0241 |
| PH 5 | 22,17 | 0,9507 | 0,3440 | 1,0979 | 1,0488 | 1,0708 | 1,0230 |
| PH 6 | 26,37 | 0,9507 | 0,3360 | 1,0944 | 1,0465 | 1,0675 | 1,0207 |
| PH 7 | 29,87 | 0,9507 | 0,3300 | 1,0919 | 1,0448 | 1,0650 | 1,0191 |
| PH 8 | 34,07 | 0,9507 | 0,3240 | 1,0893 | 1,0431 | 1,0625 | 1,0174 |
| PH 9 | 37,57 | 0,9507 | 0,3200 | 1,0876 | 1,0420 | 1,0608 | 1,0163 |
| PH 10 | 41,07 | 0,9507 | 0,3130 | 1,0846 | 1,0400 | 1,0579 | 1,0143 |
| PH 11 | 44,57 | 0,9507 | 0,3080 | 1,0825 | 1,0385 | 1,0558 | 1,0129 |
| PH 12 | 48,07 | 0,9507 | 0,3030 | 1,0803 | 1,0371 | 1,0537 | 1,0116 |
| PH 13 | 51,57 | 0,9507 | 0,2980 | 1,0782 | 1,0357 | 1,0516 | 1,0102 |
| PH 14 | 55,07 | 0,9507 | 0,2920 | 1,0756 | 1,0340 | 1,0491 | 1,0085 |

*Tableau 16: Valeurs de β normale et extrême*

Nous déterminons par la suite les valeurs de la pression dynamique suivant les deux directions :

| Niveau | H (m) | q normale (daN/m²) | | q extrême (daN/m²) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | qx | qy | qx | qy |
| PH RDC | 3,97 | 51,380 | 48,992 | 87,703 | 83,627 |
| PH 1 | 7,47 | 56,475 | 53,851 | 96,400 | 91,920 |
| PH 2 | 10,97 | 61,044 | 58,214 | 104,200 | 99,369 |
| PH 3 | 15,17 | 65,836 | 62,827 | 112,378 | 107,243 |
| PH 4 | 18,67 | 69,409 | 66,277 | 118,478 | 113,131 |
| PH 5 | 22,17 | 72,682 | 69,434 | 124,065 | 118,521 |
| PH 6 | 26,37 | 76,139 | 72,806 | 129,966 | 124,276 |
| PH 7 | 29,87 | 78,761 | 75,367 | 134,442 | 128,647 |
| PH 8 | 34,07 | 83,512 | 79,970 | 142,552 | 136,506 |
| PH 9 | 37,57 | 87,323 | 83,659 | 149,056 | 142,802 |
| PH 10 | 41,07 | 90,927 | 87,185 | 155,208 | 148,820 |
| PH 11 | 44,57 | 94,506 | 90,671 | 161,317 | 154,772 |
| PH 12 | 48,07 | 98,000 | 94,080 | 167,281 | 160,591 |
| PH 13 | 51,57 | 101,416 | 97,419 | 173,113 | 166,289 |
| PH 14 | 55,07 | 104,719 | 100,665 | 178,750 | 171,830 |

*Tableau 17: Valeurs de la pression dynamique surfacique*

Nous remarquons que l'action du vent est prépondérante suivant la direction X, les calculs par la suite porteront sur cette direction :

| Niveau | Hauteur (m) | qx normale (daN/m) | qx extrême (daN/m) |
|---|---|---|---|
| PH RDC | 3,97 | 293,892 | 501,661 |
| PH 1 | 3,5 | 197,663 | 337,401 |
| PH 2 | 3,5 | 235,020 | 401,168 |
| PH 3 | 4,2 | 253,467 | 432,656 |
| PH 4 | 3,5 | 242,932 | 414,674 |
| PH 5 | 3,5 | 279,826 | 477,650 |
| PH 6 | 4,2 | 293,137 | 500,371 |
| PH 7 | 3,5 | 303,230 | 517,600 |
| PH 8 | 4,2 | 321,523 | 548,825 |
| PH 9 | 3,5 | 305,631 | 521,697 |
| PH 10 | 3,5 | 318,243 | 543,227 |
| PH 11 | 3,5 | 330,771 | 564,610 |
| PH 12 | 3,5 | 343,000 | 585,485 |
| PH 13 | 3,5 | 354,956 | 605,894 |
| PH 14 | 3,5 | 183,258 | 312,812 |

*Tableau 18: Valeurs de la pression dynamique linéaire suivant la direction X*

Nous déterminons donc les efforts générés au niveau des étages pour pouvoir les comparer aux résultats obtenus par le Logiciel Robot.

Pour le cas de notre construction qui est à base rectangulaire et à toiture-terrasse, la force de renversement exercée par le vent est exprimée par T = 1,3 q h a (ou b) que la construction soit fermée ou ouverte.

| | | | Vent normal (KN) | | Vent extrême (KN) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Niveau** | **Largeur** | **1,3*B** | **qx (manuel)** | **qx (Robot)** | **qx (manuel)** | **qx (Robot)** |
| PH RDC | 56,7 | 73,71 | 216,63 | 280,03 | 369,77 | 457,33 |
| PH 1 | 61,64 | 80,132 | 158,39 | 160,27 | 270,37 | 261,74 |
| PH 2 | 61,64 | 80,132 | 188,33 | 241,75 | 321,46 | 394,92 |
| PH 3 | 61,64 | 80,132 | 203,11 | 288,86 | 346,70 | 472,41 |
| PH 4 | 53,04 | 68,952 | 167,51 | 239,86 | 285,93 | 392,65 |
| PH 5 | 53,04 | 68,952 | 192,95 | 200,52 | 329,35 | 328,57 |
| PH 6 | 55,06 | 71,578 | 209,82 | 239,58 | 358,16 | 393,03 |
| PH 7 | 53,71 | 69,823 | 211,72 | 201,76 | 361,40 | 331,31 |
| PH 8 | 55,74 | 72,462 | 232,98 | 250,04 | 397,69 | 411,07 |
| PH 9 | 46,28 | 60,164 | 183,88 | 218,51 | 313,87 | 359,61 |
| PH 10 | 46,28 | 60,164 | 191,47 | 217,71 | 326,83 | 358,64 |
| PH 11 | 46,28 | 60,164 | 199,00 | 230,47 | 339,69 | 380,04 |
| PH 12 | 46,28 | 60,164 | 206,36 | 243,12 | 352,25 | 401,31 |
| PH 13 | 46,28 | 60,164 | 213,56 | 242,21 | 364,53 | 400,22 |
| PH 14 | 46,28 | 60,164 | 110,26 | 241,28 | 188,20 | 399,10 |

*Tableau 19: Comparaison entre le calcul manuel et le calcul par Robot*

Nous remarquons que les valeurs sont très semblables avec un petit écart qui peut être dû à :

- Le logiciel Robot ne prend pas la plus grande dimension horizontale perpendiculairement à la direction du vent choisie, il fait les calculs en tenant compte de la plus grande dimension absolue dans toutes les directions ;
- Le logiciel fait un calcul de la période propre du bâtiment par éléments finis, du coup il obtient une valeur différente à celle qu'on a trouvée par la formule approchée. Par la suite, les valeurs du coefficient ξ qui dépend automatiquement de la période T change, ce qui justifie encore cette petite différence.

### I.3.2. Actions perpendiculaires à la direction du vent :

En dehors des actions dynamiques parallèles à la direction du vent, les structures hautes et élancées placées dans un vent même régulier peuvent être soumises à des sollicitations dynamiques qui agissent perpendiculairement à la direction du vent, et les mettent en état d'oscillations forcées.

Ces actions sont engendrées par des pressions qui doivent être considérées comme normales. Les phénomènes correspondants doivent être étudiés soit par analyse mathématique, soit

expérimentalement, et des dispositions convenables doivent être prises pour éliminer les risques de destruction par instabilité dynamique.

Parmi ces actions les plus courantes les tourbillons dits de « Bénard-Karman » qui peuvent devenir dangereux lorsque leurs fréquences avoisinent l'une des fréquences propres de la structure. (Annexe 8 de NV65)

La période des tourbillons est donnée par :

$$Tk = {}^{d}/_{SV} \qquad \text{Équation 10}$$

- V étant la vitesse du fluide.
- d la largeur de la surface soumise à l'action du vent.
- S un nombre dit nombre de Strouhal, fonction de la rugosité des surfaces, de la forme de la construction et de la viscosité du fluide.
- T étant la période de vibration propre de la construction, il y a résonance lorsque T = $T_k$, et par suite Ver = d/ST.

Dans le cas de la résonance le vent a pour vitesse les valeurs suivantes :

| | | | |
|---|---|---|---|
| dx (m) | 29,360 | dy (m) | 55,740 |
| Tx (s) | 0,657 | Ty (s) | 0,416 |
| Ver X (m/s) | 178,846 | Ver Y (m/s) | 535,966 |

Dans **la région I** la vitesse de vent maximale est de **39 m/s.**

Remarque : L'augmentation de la vitesse du vent diminue la possibilité de mise en résonance. On a donc admis arbitrairement qu'à partir de la vitesse de 25 m/s, il était inutile de faire un calcul à la résonance.

### *I.4. Action statique du vent :*

La face extérieure des parois d'une construction est soumise :

- A des succions, si les parois sont « sous le vent » ;
- A des pressions ou à des succions, si elles sont « au vent ».

Ces actions sont dites actions extérieures.

Dans les constructions fermées, ouvertes ou partiellement ouvertes, les volumes intérieurs compris entre les parois peuvent être dans un état de surpression ou de dépression suivant l'orientation des ouvertures par rapport au vent et leur importance relative. Il en résulte sur les faces intérieures des actions dites actions intérieures qui sont principalement fonction de la perméabilité.

Les actions extérieures sont caractérisées par un coefficient Ce, les actions intérieures par un coefficient Ci. Ces coefficients sont calculés comme suit :

$$\begin{cases} Une\ surpression\ Ci = +0{,}6(1{,}8 - 1{,}3Y0) \\ Une\ dépression\ Ci = -0{,}6(1{,}3Y0 - 0{,}8) \end{cases} \qquad \text{Équation 11}$$

$$\begin{cases} Face\ au\ vent\ Ce = +0{,}8\ (quel\ que\ soit Y0) \\ Face\ sous\ le\ vent\ Ce = -(1{,}3Y0 - 0{,}8) \end{cases} \qquad \text{Équation 12}$$


LAHSAINI HANAE www.cours-genie-civil.com BAKHARI MOHAMMED

La valeur de $\Upsilon_0$ est obtenue à partie du diagramme suivant :

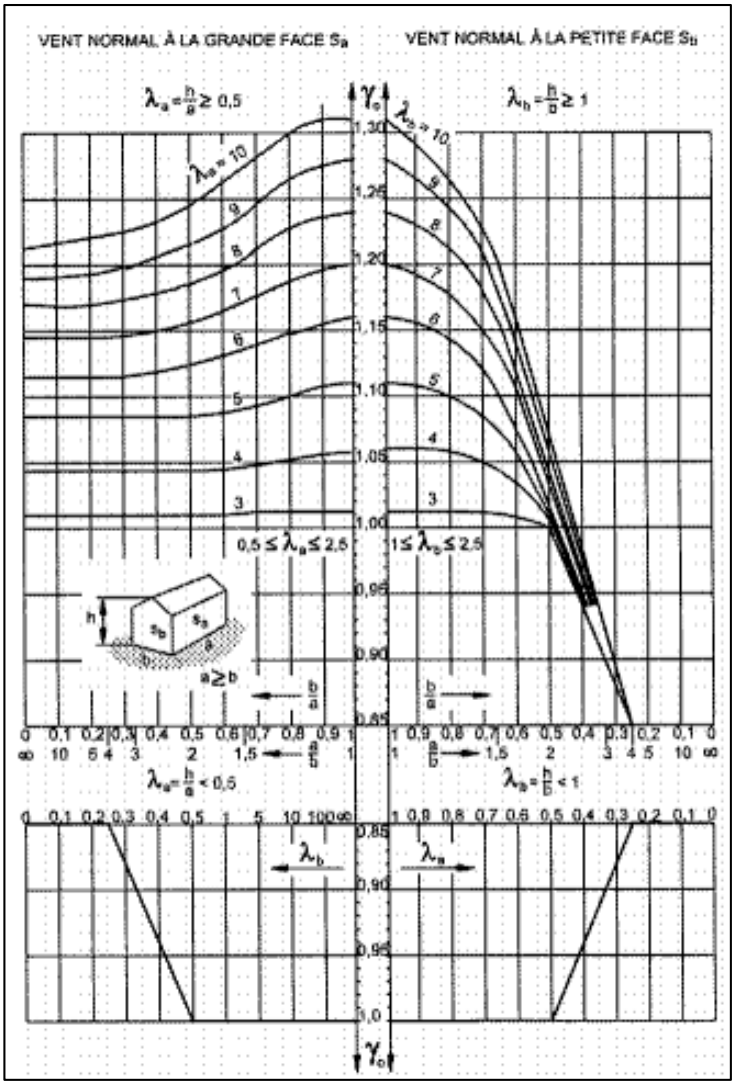



*Figure 7: Valeurs de ϒ0*

| RDC, 1er, 2ème et 3ème Etage | | | | | Etage courant | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H | dx | dy | λx = λb | λy = λa | H | dx | dy | λx = λb | λy = λa |
| 55,07 | 59,33 | 61,64 | 0,93 | 0,89 | 55,07 | 29,4 | 55,75 | 1,88 | 0,99 |
| ϒ0 = 1 | | | | | | | | | |

*Tableau 20: Valeurs de ϒ0*

Nous obtenons donc les valeurs suivantes :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Ce | face au vent | 0,8 | Ce - Ci | |
| | face sous vent | -0,5 | | |
| Ci | Surpression | 0,3 | au vent | 1,1 |
| | Dépression | -0,3 | sous vent | -0,8 |

*Tableau 21: Valeurs des coefficients Ce et Ci*

Le calcul de l'action statique du vent donne les résultats suivants :

| Niveau | qx normale (daN/m) | | qx extrême (daN/m) | |
|---|---|---|---|---|
| | **au vent** | **sous vent** | **au vent** | **sous vent** |
| PH RDC | 323,282 | -235,114 | 551,827 | -401,328 |
| PH 1 | 217,429 | -158,130 | 371,141 | -269,921 |
| PH 2 | 258,522 | -188,016 | 441,285 | -320,934 |
| PH 3 | 278,814 | -202,773 | 475,922 | -346,125 |
| PH 4 | 267,226 | -194,346 | 456,142 | -331,739 |
| PH 5 | 307,809 | -223,861 | 525,415 | -382,120 |
| PH 6 | 322,450 | -234,509 | 550,408 | -400,297 |
| PH 7 | 333,553 | -242,584 | 569,360 | -414,080 |
| PH 8 | 353,675 | -257,218 | 603,708 | -439,060 |
| PH 9 | 336,194 | -244,504 | 573,867 | -417,358 |
| PH 10 | 350,068 | -254,595 | 597,549 | -434,581 |
| PH 11 | 363,848 | -264,616 | 621,071 | -451,688 |
| PH 12 | 377,300 | -274,400 | 644,034 | -468,388 |
| PH 13 | 390,452 | -283,965 | 666,483 | -484,715 |
| PH 14 | 201,583 | -146,606 | 344,093 | -250,250 |

*Tableau 22: Action statique du vent*

## II. Etude sismique :

Un tremblement de terre est une libération brutale de l'énergie potentielle accumulée dans les couches superficielles de la terre à cause du mouvement relatif des différentes couches de l'écorce terrestre. Lorsque les contraintes dépassent un certain seuil, une rupture d'équilibre donne naissance à des ondes sismiques qui se propagent et atteignent la surface du sol.

### *I.1 Hypothèses de calcul :*

L'étude sismique de notre structure est menée suivant les Règles RPS 2000. Pour cela il est nécessaire au préalable de définir les différents paramètres sismiques intervenant dans le calcul.

#### II.1.1. Sismicité du lieu :

Pour simplifier le calcul des charges sismiques et uniformiser les exigences de dimensionnement des structures, le RPS 2000 utilise l'approche des zones. Il s'agit de diviser le pays en plusieurs zones de sismicité homogène et présentant approximativement le même niveau de risque pour une probabilité donnée. Nous distinguons donc trois zones :

| **Zone** | **A = $A_{max}$/g** |
|---|---|
| Zone 1 | 0,01 |
| ***Zone 2*** | ***0,08*** |
| Zone 3 | 0,16 |

*Tableau 23: coefficient d'accélération*

Notre structure se situe dans la zone 2.

### II.1.2. Classe du bâtiment :

Ce paramètre définit le bâtiment en fonction de son importance socio-économique.

- Classe I : regroupe les constructions destinées à des activités sociales et économiques vitales pour la population et qui devraient rester fonctionnelles, avec peu de dommage, pendant le séisme.
- Classe II : regroupe les constructions n'appartenant pas à la classe I, tels que : Les bâtiments courants à usage d'habitation, de bureaux ou commercial. **C'est le cas de notre immeuble.**

| Classe de construction | Coefficient I |
|---|---|
| Classe I | 1,3 |
| **Classe II** | **1,0** |

*Tableau 24: Coefficient de priorité*

A partir de la classe du bâtiment nous déterminons le niveau de ductilité de notre structure qui traduit sa capacité à dissiper l'énergie provenant du séisme :

| Classe | Amax ≤ 0,1 g | 0,1 g < Amax ≤ 0,2g | 0,2 g < Amax |
|---|---|---|---|
| Classe I | ***ND1*** | ND2 | ND3 |
| **Classe II** | **ND1** | | ND2 |

*Tableau 25: Ductilité et classe de bâtiments*

En tenant compte de cette ductilité ainsi que du système de contreventement adopté nous déterminons le coefficient de comportement qui caractérise la capacité de dissipation de l'énergie vibratoire de la structure qui lui est transmise par les secousses sismiques :

| Système de contreventement | ND1 | ND2 | ND3 |
|---|---|---|---|
| Portiques | 2 | 3,5 | 5 |
| Murs et refends | 2 | 3 | 4 |
| **Refends** | **1,4** | 2,1 | 2,8 |

*Tableau 26: Facteur de comportement K*

### II.1.3. Type de site :

Les caractéristiques géologiques d'un site conditionnent la réponse de la structure au séisme.


www.cours-genie-civil.com

Les Règles RPS 2000 définissent donc différents types de sites auxquels sont associés différents coefficients :

| Sites | Nature | Coefficient |
|---|---|---|
| **S1** | **Rocher toute profondeur**<br>**Sols fermes épaisseur < 15m** | **1** |
| **S2** | Sols fermés épaisseur > 15 m<br>Sols moyennement ferme épaisseur < 15 m<br>Sols Mous épaisseur < 10 m | 1,2 |
| **S3** | Sols moyennement ferme épaisseur > 15 m<br>Sols Mous épaisseur > 10 m | 1,5 |

*Tableau 27: Coefficient du site*

#### II.1.4. Amortissement de la structure :

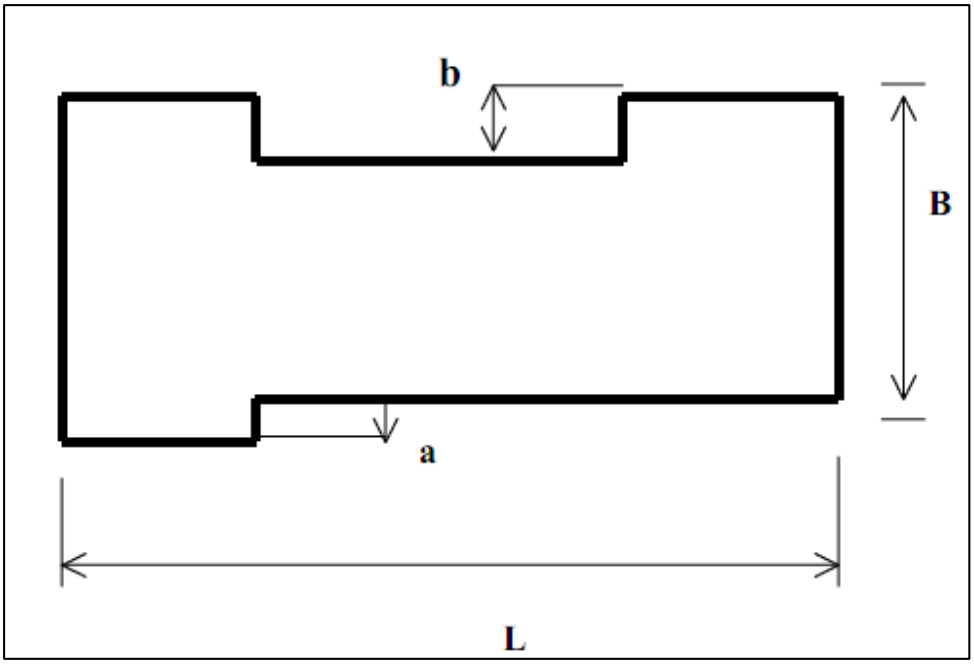
L'amortissement ξ traduit la capacité de la structure soumise à des effets dynamiques à dissiper de l'énergie. Il dépend essentiellement du type de matériau et, pour une faible part, des contacts avec les éléments non structuraux. La valeur de l'amortissement pour le cas de notre bâtiment est généralement ξ = 5%.

| Type de structure | ξ (%) |
|---|---|
| Structures en béton armé<br>**Ossatures métalliques avec murs extérieurs lourds et cloisons** | ***5*** |
| Ossatures métalliques avec murs extérieurs légers | 3 |

*Tableau 28: Coefficient d'amortissement*

### *II.2. Régularité de la structure :*

#### II.2.1. Vérification de la régularité en PLAN :



| | | |
|---|---|---|
| 1 | La structure doit présenter une forme en plan simple, tel que le rectangle, et une distribution de masse et rigidité sensiblement symétrique vis-à-vis de deux directions orthogonales au moins, le long desquelles sont orientés les éléments structuraux. | **NON VERIFIE** |
| 2 | En présence de parties saillantes ou rentrantes leurs dimensions ne doivent pas dépasser 0.25 fois la dimension du côté correspondant : $a + b \leq 0.25 \times B$ | **NON VERIFIE** |
| 3 | A chaque niveau, la distance entre le centre de masse et le centre de rigidité, mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique, ne doit pas dépasser 0.20 fois la racine carrée du rapport de la raideur de torsion sur la raideur de translation. | **NON VERIFIE** |
| 4 | L'élancement (grand côté/petit côté ne doit pas dépasser la valeur 3,5) | **VERIFIE** |

Les justifications sont en annexe.

### II.2.2. Vérification de la régularité en ELEVATION :

| | | |
|---|---|---|
| 1 | La distribution de la rigidité et de la masse doit être sensiblement régulière le long de la hauteur. Les variations de la rigidité et de la masse entre deux étages successifs ne doivent pas dépasser respectivement 30 % et 15 %. | **NON VERIFIE** |
| 2 | Dans le cas d'un rétrécissement graduel en élévation, le retrait à chaque niveau ne doit pas dépasser 0.15 fois la dimension en plan du niveau précédant sans que le retrait global ne dépasse 25% de la dimension en plan au niveau du sol. | **NON VERIFIE** |
| 3 | Dans le cas d'un élargissement graduel sur la hauteur, la saillie ne doit pas dépasser 10% de la dimension en plan du niveau précédent sans que le débordement global ne dépasse 25% de la dimension en plan au niveau du sol. | **NON VERIFIE** |

## *II.3.* Résultats de l'analyse modale *:*

### II.3.1. Combinaisons de Newmark :

L'action sismique n'a généralement pas de direction privilégiée. Les combinaisons de Newmark permettent de tenir compte de la simultanéité des composantes du mouvement sismique dans les trois directions de l'espace. Les maximas des effets des différentes composantes peuvent être déterminés séparément et combinés suivant les formulations suivantes :

$$\begin{cases} S = \pm Sx \pm \lambda Sy \pm \mu Sz \\ S = \pm \lambda Sx \pm Sy \pm \mu Sz \\ S = \pm \lambda Sx \pm \mu Sy \pm Sz \end{cases} \qquad \textit{Équation 13}$$

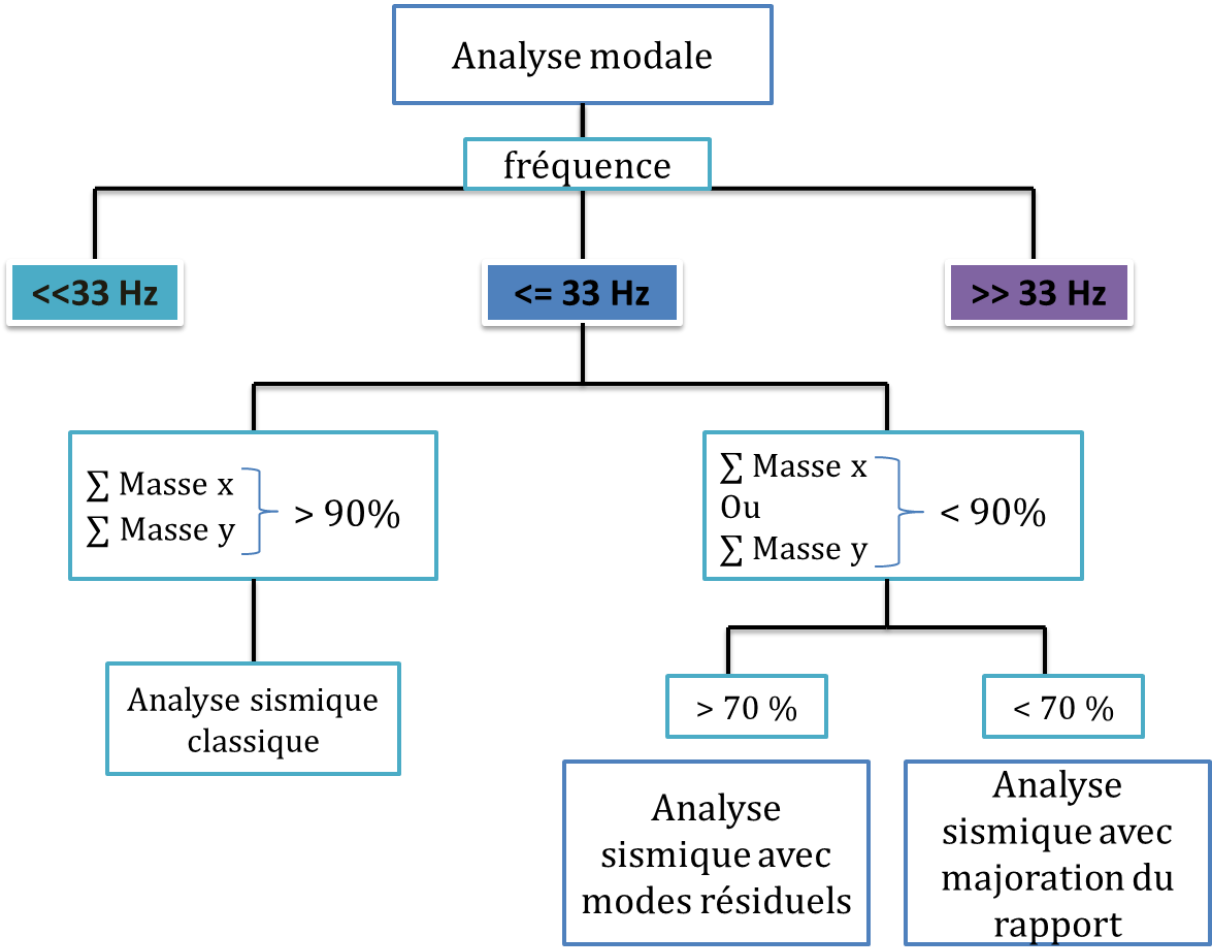
Sx, Sy, Sz désignent respectivement les composantes du mouvement sismique dans les directions X, Y et Z. Les coefficients λ et μ prennent la valeur de 0,2 et 0,3 successivement.

### II.3.2. Calcul et résultats :

Le principe du calcul sismique effectué par le logiciel repose sur une méthode d'analyse spectrale modale. Les règles RPS 2000 imposent certaines conditions pour la sélection des modes :

- Le calcul des modes de vibration doit être poursuivi jusqu'à la fréquence de 33 Hz ;
- Le nombre de modes retenus ne peut être inférieur à trois ;
- La suite des modes peut être interrompue si le cumul des masses modales dans la direction de l'excitation considérée atteint 90% de la masse vibrante totale du système. Dans ce cas les effets des modes non retenus peuvent être négligés ;
- Si le cumul des masses modales n'atteint que la valeur de 70% de la masse vibrante totale du système, la suite des modes peut être interrompue avant la fréquence de 33Hz, à condition que les modes résiduels soient pris en compte dans le calcul.

Dans le cas de notre structure, nous atteignons une masse de 90% pour les deux directions X et Y pour un nombre de 108 modes.



| Mode | Fréquence (Hz) | Masses Cumulées UX (%) | Masses Cumulées UY (%) | Masse Modale UX (%) | Masse Modale UX (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,88 | 55,33 | 0,55 | 55,33 | 0,55 |
| 2 | 1,06 | 62,89 | 9,20 | 7,56 | 8,66 |
| 3 | 1,36 | 63,00 | 63,44 | 0,11 | 54,24 |
| 4 | 2,50 | 63,61 | 67,06 | 0,61 | 3,61 |
| 5 | 3,28 | 79,57 | 67,24 | 15,96 | 0,18 |
| 6 | 3,54 | 82,94 | 67,24 | 3,38 | 0,00 |
| 7 | 4,19 | 83,10 | 68,38 | 0,15 | 1,14 |
| 8 | 4,36 | 83,16 | 68,64 | 0,06 | 0,26 |
| 9 | 4,64 | 83,18 | 69,84 | 0,02 | 1,19 |
| 10 | 4,67 | 83,19 | 72,87 | 0,00 | 3,04 |
| 11 | 4,78 | 83,19 | 72,89 | 0,00 | 0,01 |
| 12 | 4,92 | 83,19 | 72,89 | 0,00 | 0,00 |
| 13 | 5,44 | 83,21 | 76,43 | 0,02 | 3,54 |
| 14 | 5,47 | 83,23 | 76,43 | 0,02 | 0,00 |
| … | … | … | … | … | … |
| 84 | 12,69 | 88,82 | 88,00 | 0,01 | 0,01 |
| 85 | 12,74 | 88,83 | 88,00 | 0,02 | 0,00 |
| 86 | 12,90 | 89,16 | 88,02 | 0,33 | 0,02 |
| 87 | 13,06 | ***90,00*** | 88,04 | 0,84 | 0,02 |
| 88 | 13,09 | 90,00 | 88,05 | 0,00 | 0,01 |
| 89 | 13,24 | 90,00 | 88,06 | 0,00 | 0,00 |
| 90 | 13,38 | 90,19 | 88,06 | 0,19 | 0,00 |
| 91 | 13,43 | 90,63 | 88,06 | 0,44 | 0,00 |
| 92 | 13,56 | 90,64 | 88,06 | 0,00 | 0,00 |
| 93 | 13,58 | 90,64 | 88,06 | 0,00 | 0,00 |
| 94 | 13,62 | 90,64 | 88,06 | 0,00 | 0,00 |
| 95 | 13,78 | 90,64 | 88,06 | 0,00 | 0,00 |
| 96 | 13,89 | 90,65 | 88,07 | 0,01 | 0,00 |
| 97 | 14,15 | 90,69 | 88,10 | 0,04 | 0,03 |
| 98 | 14,25 | 90,74 | 88,15 | 0,05 | 0,04 |
| 99 | 14,29 | 90,97 | 88,24 | 0,23 | 0,09 |
| 100 | 14,42 | 90,98 | 88,25 | 0,01 | 0,01 |
| 101 | 14,53 | 90,99 | 88,25 | 0,01 | 0,00 |
| 102 | 14,67 | 90,99 | 88,25 | 0,00 | 0,00 |
| 103 | 15,33 | 90,99 | 88,27 | 0,00 | 0,02 |
| 104 | 15,43 | 91,00 | 88,61 | 0,01 | 0,34 |
| 105 | 15,57 | 91,00 | 89,07 | 0,00 | 0,46 |
| 106 | 15,79 | 91,02 | 89,18 | 0,02 | 0,12 |
| 107 | 15,85 | 91,02 | 89,53 | 0,00 | 0,34 |
| 108 | 15,93 | 91,04 | ***90,02*** | 0,02 | 0,49 |

*Tableau 29: Résultats de l'analyse modale pour les trois modes prépondérants*

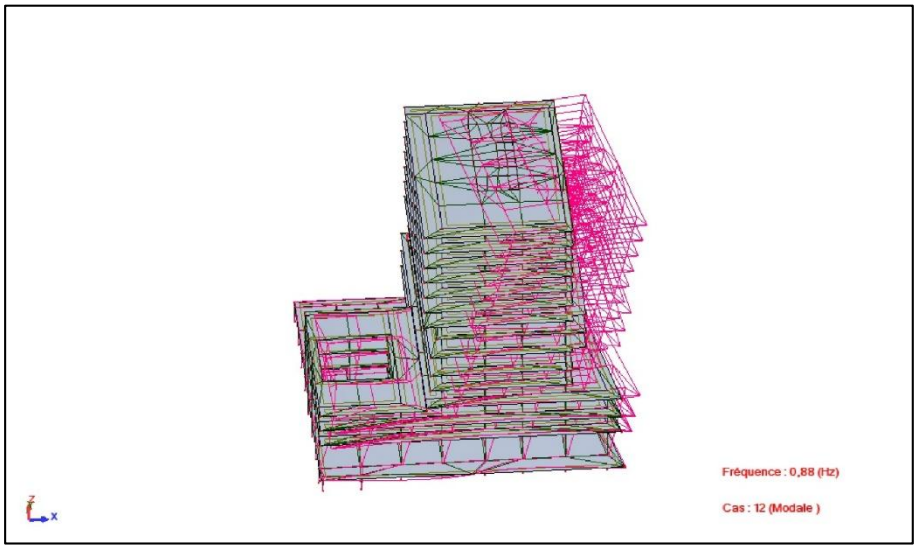



*Figure 8: Déformée du premier mode/ flexion selon l'axe X*

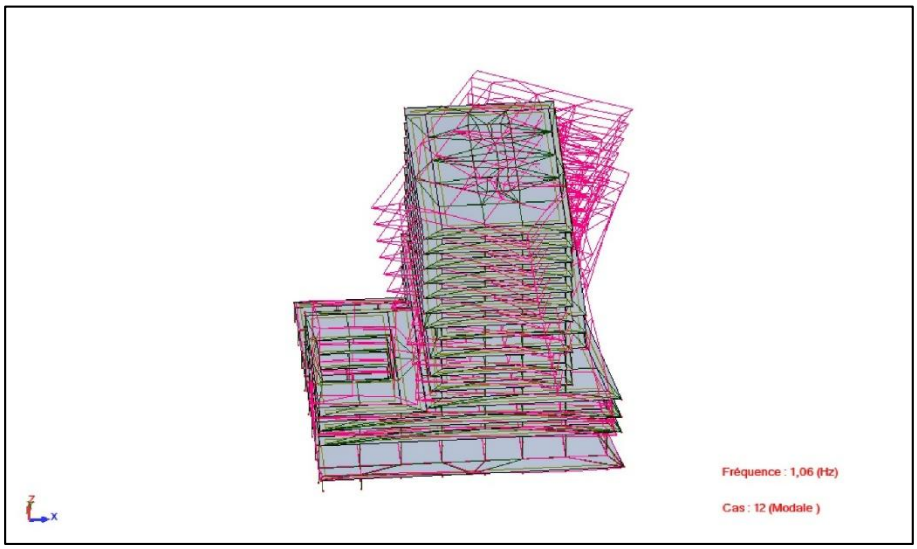



*Figure 9: Déformée du deuxième mode/ mode de torsion*

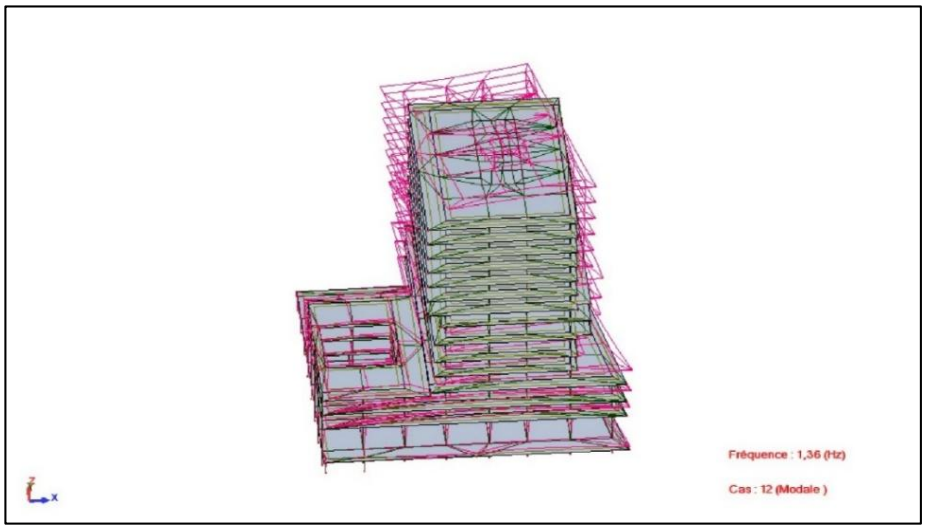



*Figure 10: déformée du troisième mode/ flexion selon l'axe Y*

## III. Comparaison et vérification :

Nous sommes amenés à déterminer les actions les plus prépondérantes et à vérifier la stabilité de notre structure sous l'effet de ces actions ainsi que les déformations limites. Si ces vérifications sont satisfaisantes la structure est considérée répondre aux exigences de sécurité et de fonctionnalité.

### *III.1. Comparaison Vent / séisme :*

Nous comparons les efforts réduits du vent et de séisme pour les combinaisons les plus défavorables.

| Voiles | Vent | | Séisme | |
|---|---|---|---|---|
| | Mz (kN.m) | Ty (kN) | Mz (kN.m) | Ty (kN) |
| V1 | 136,88 | 323,3 | 624,4 | 528,56 |
| V2 | 133,72 | 442,6 | 482,69 | 701,04 |
| V3 | 858,59 | 511,04 | 1694,43 | 904,99 |
| V4 | -4,06 | 708,06 | 2341,53 | 1199,56 |
| V5 | 541,32 | 755,73 | 1777,72 | 1121,14 |
| V6 | 99,73 | 587,91 | 639,12 | 736,71 |
| V7 | 206,95 | 466,53 | 880,31 | 525,39 |
| V8 | 1000,67 | 243,87 | 17212,32 | 1578,93 |
| V9 | 243,68 | 486,44 | 3529,13 | 712,4 |
| V10 | 53,18 | 571,35 | 2735,61 | 485,85 |
| V11 | 55,24 | 538,96 | 2783,87 | 571,16 |
| V12 | 11,87 | 539,48 | 2654,87 | 615,33 |
| V13 | 57,71 | 570,71 | 2961,56 | 732,68 |
| V14 | 109,3 | 546,52 | 3471,51 | 683,21 |
| V15 | 56,83 | 292,25 | 217,94 | 288,6 |
| V16 | 61,43 | 149,26 | 140,23 | 567,88 |

*Tableau 30: Comparaison Vent/ Séisme*

L'action du séisme est la plus déterminante ; Nous tenons donc compte du séisme dans le calcul de notre construction.

### III.2. Vérification de la structure :

#### III.2.1. Vérification des déformations :

Le but est de vérifier que la structure évolue dans le domaine de ses propriétés qui est pris en compte dans le calcul et contenir les dommages structuraux dans des limites acceptables.


www.cours-genie-civil.com

| | |
|---|---|
| Sous l'effet des actions d'ensemble les déformations des éléments de la structure restent limitées aux valeurs maximales fixées. | **VERIFIE** |
| Les déplacements latéraux inter-étages évalués à partir des actions de calcul doivent être limités à :<br>$K.\Delta el \leq 0,007h$ **Pour bâtiment de classe I**<br>$K.\Delta el \leq 0,010h$ **Pour bâtiment de classe II**<br>Le déplacement latéral total du bâtiment doit être limité à:<br>$\Delta g \leq 0,004h$<br>$\begin{cases} h\ étant\ la\ hauteur\ de\ l'étage. \\ K: coefficient\ du\ comportement \end{cases}$ | **VERIFIE**<br>(Voir tableau ci-dessous) |
| Les éléments non structuraux doivent être conçus de manière à ne pas transmettre au système structural des efforts qui n'ont pas été pris en compte dans les calculs. | **VERIFIE** |

- Déplacements inter-étages :

| Niveau | H (m) | Déplacement | | Δ (inter-étage) | | Valeurs limites (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Dx (mm) | Dy (mm) | Δex (mm) | Δey (mm) | |
| RDC | 3,4 | 2,68 | 2,63 | 2,68 | 2,63 | 24,29 |
| 1 ET | 3,97 | 4,60 | 3,48 | 1,92 | 0,85 | 28,36 |
| 2 ET | 3,5 | 7,19 | 5,70 | 2,59 | 2,22 | 25 |
| 3 ET | 3,5 | 9,30 | 7,68 | 2,11 | 1,98 | 25 |
| 4 ET | 4,2 | 15,18 | 9,80 | 5,88 | 2,12 | 30 |
| 5 ET | 3,5 | 14,43 | 10,92 | -0,75 | 1,12 | 25 |
| 6 ET | 3,5 | 17,39 | 13,16 | 2,96 | 2,24 | 25 |
| 7 ET | 4,2 | 21,24 | 16,67 | 3,85 | 3,51 | 30 |
| 8 ET | 3,5 | 23,69 | 18,87 | 2,45 | 2,20 | 25 |
| 9 ET | 4,2 | 28,37 | 21,46 | 4,68 | 2,59 | 30 |
| 10 ET | 3,5 | 31,32 | 20,42 | 2,95 | -1,04 | 25 |
| 11 ET | 3,5 | 34,20 | 22,16 | 2,88 | 1,74 | 25 |
| 12 ET | 3,5 | 37,10 | 23,86 | 2,90 | 1,70 | 25 |
| 13 ET | 3,5 | 39,88 | 25,48 | 2,78 | 1,62 | 25 |
| 14 ET | 3,5 | 42,59 | 27,03 | 2,71 | 1,55 | 25 |
| Terrasse | 3,5 | 45,08 | 28,46 | 2,49 | 1,43 | 25 |

*Tableau 31: Déplacement inter-étages*

- Déplacements Totaux :

| **Δg limite (cm)** | **22,03** |
|---|---|
| **Δx (cm)** | Δy (cm) |
| **4,51** | 2,85 |

*Tableau 32: Déplacement total*

### III.2.2. Vérification de la stabilité :

- Stabilité au glissement :

Le rocher à un niveau presque constant avec un léger pendage vers la mer, donc on n'est pas amené à effectuer cette vérification.

- Stabilité au renversement :

La structure doit être dimensionnée pour résister aux effets de renversement dû aux combinaisons des actions de calcul. Un ancrage est exigé si l'effet des charges de calcul est supérieur à l'effet de stabilisation.

- La stabilité est considérée satisfaite si :

$$\theta = \frac{KW\Delta el}{VH} \leq 0{,}10 \qquad \text{Équation 14}$$

- L'effet du second ordre est à prendre en compte dans le calcul pour : $0{,}1 < \theta \leq 0{,}2$
- La stabilité est considérée non satisfaite si : $\theta > 0{,}2$

$$\begin{cases} \theta : indice\ de\ stabilité \\ W : poids\ au\ dessus\ de\ l'étage\ considéré \\ V : action\ sismique\ au\ niveau\ considé ré \\ h : hauteur\ de\ l'étage \\ \Delta el : déplacement\ relatif \end{cases}$$

Les calculs ci-dessous prouvent que ce critère est bien vérifié et la stabilité est satisfaite.

| Niveau | H (m) | W (T) | Séisme Sens X | | | Séisme Sens Y | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Vx (T) | Δex (mm) | θx | Vy (T) | Δey (mm) | θy |
| SS | 3,40 | 4155,94 | 130,60 | 2,68 | 0,0351 | 131,86 | 2,63 | 0,0341 |
| RDC | 3,97 | 3705,74 | 127,42 | 1,92 | 0,0197 | 127,24 | 0,85 | 0,0087 |
| 1 ET | 3,50 | 3279,94 | 123,36 | 2,59 | 0,0275 | 122,57 | 2,22 | 0,0238 |
| 2 ET | 3,50 | 2901,44 | 116,00 | 2,11 | 0,0211 | 115,87 | 1,98 | 0,0198 |
| 3 ET | 4,20 | 2554,89 | 104,22 | 5,88 | 0,0480 | 105,47 | 2,12 | 0,0171 |
| 4 ET | 3,50 | 2186,72 | 85,90 | -0,75 | -0,0076 | 89,85 | 1,12 | 0,0109 |
| 5 ET | 3,50 | 1947,15 | 78,16 | 2,96 | 0,0295 | 83,35 | 2,24 | 0,0209 |
| 6 ET | 4,20 | 1707,58 | 71,03 | 3,85 | 0,0309 | 77,15 | 3,51 | 0,0259 |
| 7 ET | 3,50 | 1435,06 | 63,33 | 2,45 | 0,0222 | 69,87 | 2,20 | 0,0181 |
| 8 ET | 4,20 | 1219,69 | 56,08 | 4,68 | 0,0339 | 62,42 | 2,59 | 0,0169 |
| 9 ET | 3,50 | 974,39 | 48,55 | 2,95 | 0,0237 | 54,06 | -1,04 | -0,0075 |
| 10 ET | 3,50 | 791,79 | 42,28 | 2,88 | 0,0216 | 46,82 | 1,74 | 0,0118 |
| 11 ET | 3,50 | 616,92 | 35,75 | 2,90 | 0,0200 | 39,25 | 1,70 | 0,0107 |
| 12 ET | 3,50 | 455,65 | 28,87 | 2,78 | 0,0176 | 31,28 | 1,62 | 0,0094 |
| 13 ET | 3,50 | 300,25 | 21,41 | 2,71 | 0,0152 | 22,82 | 1,55 | 0,0082 |
| 14 ET | 3,50 | 150,13 | 12,99 | 2,49 | 0,0115 | 13,59 | 1,43 | 0,0063 |

Tableau 33: Stabilité au renversement

# CHAPITRE 5 : DIMENSIONNEMENT DES ÉLÉMENTS DE STRUCTURE

Nous présentons dans cette partie le calcul manuel des éléments porteurs de la structure à savoir les poteaux, la dalle, les voiles, les semelles isolées ainsi que le radier sous noyau.

## I. Poteaux :

Les poteaux de notre construction n'interviennent pas dans la stabilité horizontale du bâtiment du fait que le contreventement est assuré par les voiles. Ils sont soumis à une compression considérée centrée ; la charge portante peut donc être déterminée par la méthode forfaitaire.

Les charges verticales sont calculées suivant la combinaison fondamentale de l'état limite.
Ces charges sont évaluées en faisant application de la loi de dégression des charges d'exploitation dans les bâtiments à étages ;
Toutefois, à défaut de calculs plus précis, dans les bâtiments comportant des travées solidaires supportées par deux files de poteaux de rive et une ou plusieurs files de poteaux intermédiaires ,les charges évaluées dans l'hypothèse de la discontinuité doivent être majorées forfaitairement de:

- 15 % pour des poteaux centraux dans les bâtiments à deux travées ;
- 10 % pour les poteaux intermédiaires voisins des poteaux de rive dans le cas des bâtiments comportant au moins trois travées.

Dans les bâtiments à étages dont le contreventement est assuré par un système de pans verticaux rigides (avec triangulations, voiles en béton armé ou maçonnerie de résistance suffisante) et où la continuité des poteaux est également assurée aux différents étages, la longueur de flambement d'un poteau est prise égale à :

- **0,7 $l_0$** : si le poteau est à ses extrémités soit encastré dans un massif de fondations, soit assemblé à des poutres de plancher ayant au moins la même raideur que lui dans le sens considéré et le traversant de part en part ;
- **$l_0$** : dans tous les autres cas.

- $l_0$, étant la longueur libre du poteau isolé ou la distance entre faces supérieures des planchers du bâtiment ou de la semelle de fondation

L'effort normal agissant ultime N'u d'un poteau doit être au plus égal à la valeur suivante :

$$N'u = \alpha \left[\frac{Br * fc28}{0{,}9\,\gamma b} + A\frac{fe}{\gamma s}\right] \qquad \text{Équation 15}$$

Avec :

- A est la section d'acier comprimé prise en compte dans le calcul ;
- Br est la section réduite du poteau obtenue en déduisant de sa section réelle un centimètre d'épaisseur sur toute sa périphérie ;
- $\gamma b$ = 1,5; $\gamma s$ = 1,15 ;

- $\alpha$ est un coefficient fonction de l'élancement mécanique, qui prend les valeurs :

$$\begin{cases} \alpha = \frac{0,85}{1+0,2\left(\frac{\lambda}{35}\right)^2} \quad Pour\ \lambda = \frac{lf}{i} \leq 50; \\ \alpha = 0,6\left(\frac{50}{\lambda}\right)^2 \quad Pour\ 50 < \lambda \leq 70. \\ i = \sqrt{\frac{I}{B}}\ étant\ le\ rayon\ giration \end{cases}$$ *Équation 16*

Nous obtenons les résultats suivants :

| Niveau | D (m) | Nu' (MN) | λ | α | As (cm²) | Ferraillage longitudinale |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 14 ET | 0,40 | 1,046 | 26,250 | 0,764 | 5,027 | 7 HA10 e = 18 cm |
| 13 ET | 0,40 | 2,222 | 26,250 | 0,764 | 8,923 | 8 HA12 e = 15 cm |
| 12 ET | 0,45 | 3,403 | 21,000 | 0,793 | 24,485 | 16 HA14 e = 9 cm |
| 11 ET | 0,50 | 4,589 | 19,091 | 0,802 | 39,078 | 20 HA16 e = 8 cm |
| 10 ET | 0,55 | 5,781 | 16,154 | 0,815 | 50,325 | 16 HA20 e = 10 cm |
| 9 ET | 0,60 | 6,983 | 15,000 | 0,820 | 60,846 | 20 HA20 e = 10 cm |
| 8 ET | 0,65 | 8,201 | 16,613 | 0,813 | 72,579 | 23 HA20 e = 9 cm |
| 7 ET | 0,65 | 8,997 | 13,125 | 0,827 | 90,970 | 19 HA25 e = 10 cm |
| 6 ET | 0,70 | 10,018 | 14,659 | 0,821 | 94,978 | 19 HA25 e = 11 cm |
| 5 ET | 0,75 | 11,047 | 11,667 | 0,832 | 94,978 | 19 HA25 e = 12 cm |
| 4 ET | 0,80 | 12,077 | 11,053 | 0,833 | 94,978 | 19 HA25 e = 13 cm |
| 3 ET | 0,85 | 13,220 | 12,460 | 0,829 | 94,978 | 19 HA25 e = 14 cm |
| 2 ET | 0,90 | 14,366 | 10,000 | 0,836 | 94,978 | 19 HA25 e = 15 cm |
| 1 ET | 0,90 | 15,510 | 10,000 | 0,836 | 115,661 | 24 HA25 e = 12 cm |
| RDC | 0,95 | 16,326 | 11,253 | 0,833 | 115,661 | 24 HA25 e = 12 cm |
| SS | 1,00 | 17,750 | 8,887 | 0,839 | 115,661 | 24 HA25 e = 13 cm |

*Tableau 34: Ferraillage longitudinal du poteau P- L7*

Pour le ferraillage transversal nous considérons le minimum des espacements obtenus :

$$Esp\ zone\ critique = min(15cm; 8\phi_l; 0,25 * bc)$$ *Équation 17*

$$Esp\ zone\ courante = min(30cm; 12\phi_l; 0,5 * bc)$$ *Équation 18*

La longueur critique est calculée suivant la formule :

$$Lc = max(\frac{he}{6}; hc; 45cm)$$ *Équation 19*

- hc étant la plus grande dimension de la section du poteau.

- he est la hauteur nette du poteau.

| Lc (m) | Esp Zone critique (cm) | Esp Zone courante (cm) |
|---|---|---|
| 0,54 | 10 | 12 |
| 0,54 | 9,6 | 14,4 |
| 0,54 | 11,2 | 16,8 |
| 0,54 | 12,5 | 19,2 |
| 0,55 | 13,75 | 24 |
| 0,60 | 15 | 24 |
| 0,66 | 15 | 24 |
| 0,65 | 15 | 30 |
| 0,70 | 15 | 30 |
| 0,75 | 15 | 30 |
| 0,80 | 15 | 30 |
| 0,85 | 15 | 30 |
| 0,90 | 15 | 30 |
| 0,90 | 15 | 30 |
| 0,95 | 15 | 30 |
| 1,00 | 15 | 30 |

*Tableau 35: Espacement des armatures transversales*

## II. Semelles isolées :

Le calcul porte sur la semelle sous le poteau faisant l'objet du calcul du paragraphe précèdent.

Nous appliquons la méthode des bielles qui consiste à admettre que les efforts provenant du poteau sont transmis au sol par des bielles de béton obliques.

Nous devrons donc avoir :

- $Ns \leq \frac{\pi D^2}{4} \sigma sol$ ou $D \geq 1{,}13\sqrt{\frac{Nu}{\sigma sol}}$
- $\frac{D-dp}{4} \leq d \leq D - dp$

La section As des barres de chacun des deux lits orthogonaux est donnée par la formule :

$$As = \frac{Ns(D-dp)}{8\pi d} \times \frac{1}{\sigma s} \qquad \text{Équation 20}$$

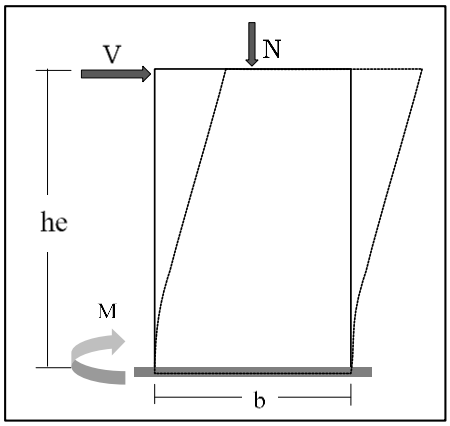
Nous obtenons donc les résultats suivant :

| Ns (MN) | Ns + PP de la terre (MN) | D (m) | h (m) | d (m) | As 1ier lit (cm²) | As 2ème lit (cm²) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **12,78** | 14,75 | 4,80 | 1,40 | 1,35 | 94,65 | 92,93 |
| Pour le premier lit nous disposons 32T20 esp=15cm<br>Pour le deuxième lit nous disposons 32T20 esp=15cm | | | | | | |

*Tableau 36: Ferraillage de semelle isolée sous le poteau P-L7*

## III. Voile :

Le modèle le plus simple d'un voile est celui d'une console parfaitement encastrée à sa base. Il est sollicité par un effort normal N et un effort tranchant V constants sur toute la hauteur et un moment fléchissant qui est maximal dans la section d'encastrement.




Le voile faisant l'objet de cette étude est le voile V4 qui a pour caractéristiques les valeurs suivantes :

| | |
|---|---|
| Epaisseur a (m) | 0,25 |
| Longueur b (m) | 6,1 |
| Hauteur he (m) | 3,15 |
| fc28 (MPa) | 30 |
| la moitié des charges est appliquée après : | 90 jours |

*Tableau 37: Caractéristique du voile V4*

Les étages sont identiques, la longueur de flambement est déterminée à partie du tableau suivant :

| | Mur armé verticalement | Mur non armé verticalement |
|---|---|---|
| Mur encastré en tête et en pied :<br>Avec plancher de part et d'autre<br>Avec plancher d'un seul côté | 0,8<br>0,85 | 0,85<br>0,9 |
| Mur articulé en tête et en pied | 1 | 1 |

*Tableau 38:Valeurs forfaitaires du rapport lf / l (tiré du DTU 23.1)*

Le coefficient $\lambda$ est calculé par la formule suivante :

$$\lambda = \frac{lf\sqrt{12}}{a} \qquad \text{Équation 21}$$

Pour un mur armé, nous déterminons $\alpha$ comme suit :

$$\begin{cases} \alpha = \dfrac{0{,}85}{1+0{,}2\left(\frac{\lambda}{35}\right)^2} & Si\ \lambda \leq 50 \\ \alpha = 0{,}6\left(\dfrac{50}{\lambda}\right)^2 & Si\ \lambda > 50 \end{cases}$$

*Équation 22*

La section Av des armatures ne doit pas être inférieure à une section minimale préconisée par le RPS et définie par :

$$Avmin = 0{,}002 \times a\ (cm^2/ml)$$

*Équation 23*

L'effort ultime est évalué par :

$$Nu\ lim = \alpha\left[\frac{Br.fc28}{0{,}8\,\gamma b} + A\frac{fe}{\gamma s}\right]$$

*Équation 24*

La contrainte limite ultime est déterminée par :

$$\sigma_{u,lim} = \frac{Nu\ lim}{a \times b}$$

| $\boldsymbol{l_f\ (m)}$ | 2,52 |
|---|---|
| $\boldsymbol{\lambda}$ | 34,92 |
| $\boldsymbol{\alpha}$ | 0,71 |
| $\boldsymbol{Nu\ lim\ (MN)}$ | 22,28 |
| $\boldsymbol{\sigma_{u,lim}\ (MPa)}$ | 14,61 |
| $\boldsymbol{\sigma_{u,lim}/\alpha}$ | 20,61 |

*Tableau 39: Caractéristiques du voile V4*

L'article 4.2 du DTU 23.1 précise que la vérification des contraintes de compression concerne deux niveaux, à mi-hauteur et au ras du plancher. Elle consiste à vérifier l'inégalité suivante :

- A mi-heuteur de l'étage nous devons vérifier que : $\sigma u = \frac{Nu}{ab} \leq \sigma u\ lim$ ;
- A l'étage la condition exigée est la suivante : $\sigma u \leq \frac{\sigma u\ lim}{\alpha}$.

Vérification à mi-hauteur :

Les sollicitations relevées du modèle par éléments finis à mi-hauteur sont :

| Nu (MN) | V (MN) | M (MN.m) |
|---|---|---|
| 12,96 | 0,36 | 2,31 |

La contrainte de compression est donnée par la relation :

$$\sigma_u = \frac{N_u}{S} + \frac{Mv}{I} = \frac{12{,}96}{1{,}525} + 2{,}31 \times 0{,}645 = 9{,}99\ MPa < \sigma_{u,lim}$$

Avec : S = 1,525 m² Aire de la section et $\frac{v}{I} = {}^{6}/_{ab^2} = {}^{6}/_{0{,}25 \cdot 6{,}1^2} = 0{,}645\ m^{-3}$ Le module d'inertie.


LAHSAINI HANAE www.cours-genie-civil.com BAKHARI MOHAMMED

Vérification au-dessous du plancher :

Les sollicitations du calcul sont :

| Nu (MN) | V (MN) | M (MN.m) |
|---|---|---|
| 13,68 | 0,42 | 2,46 |

Et donc :

$$\sigma_u = \frac{N_u}{S} + \frac{Mv}{I} = \frac{13{,}68}{1{,}525} + 2{,}46 \times 0{,}645 = 10{,}56\ MPa < \sigma_{u,lim}/\alpha$$

### *III.1. Ferraillage vertical du mur :*

Le voile est calculé en flexion composée sous un effort normal de compression N et un moment de flexion M.

La combinaison la plus défavorable donne les sollicitations suivantes :

| Nu (MN) | V (MN) | M (MN.m) |
|---|---|---|
| 13,68 | 1,76 | 3,39 |

On calcule le moment $M_u$ par rapport à la section d'acier tendue en prenant un enrobage de 5 cm, on trouve donc :

$$M_u = M + Nu\left({}^{d}/_{2} - d'\right) = 3{,}39 + 13{,}68\left(\frac{6{,}1}{2} - 0.05\right) = 44{,}43\ MN.m$$

$$M_1 = (d - d')N_u - M_u = (6{,}01 - 0.1)13{,}68 - 3{,}39 = 37{,}56\ MN.m$$

$$M_2 = \left(0.337 - 0.81\,{}^{d'}/_{d}\right) ad^2\sigma_{bc} = 52{,}24\ MN.m$$

$M_1 < M_2$ Donc la section est partiellement comprimée.

On a alors :

$$\mu = \frac{44{,}43}{0{,}25 \cdot 6{,}05^2 \cdot 17} = 0{,}286 < \mu_R = 0.371 \quad \Leftrightarrow \quad \text{Pas d'armatures comprimées.}$$

$$\alpha = 1{,}25(1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0{,}286}) = 0{,}431 \quad \Leftrightarrow \quad z = 6{,}05 \cdot (1 - 0.4 \cdot 0{,}431) = 5{,}00\ m.$$

$$A_{st} = \left(\frac{44{,}43}{5} - 13{,}68\right)\frac{1}{500} = -96{,}08\ cm^2$$

La section obtenue est négative, le mur est donc ferraillé selon la section minimale prescrite dans les règlements.

- Le pourcentage minimal des armatures verticales est :

$$\rho v \geq max[0{,}001; 0{,}015\tfrac{400\theta}{fe}\left(\tfrac{3\sigma u}{\sigma bc} - 1\right)] \qquad \textit{Équation 25}$$

Le RPS2000 fixe ce pourcentage à 0,2% de la section.

Le voile V4 est un voile intermédiaire donc $\theta = 1$.


LAHSAINI HANAE www.cours-genie-civil.com BAKHARI MOHAMMED

- Les zones critiques du voile sont les régions s'étendant de la base du mur sur une longueur *lc* définie comme suit :

$$lc = max\left(\frac{h}{6}; b\right) = 9{,}17\ m \qquad \text{Équation 26}$$

- Les espacements préconisés dans le RPS 2000 :

$S_{tmin}$ = min (1,5*a ; 20cm) en zone critique.

$S_{tmin}$ = min (1,5*a ; 30cm) en zone courante.

| | | |
|---|---|---|
| Espacement St (cm) < | 20 | La partie du voile à étudier est située en zone critique. |
| φt (mm) | 6 | |

*Tableau 40: Armature transversale*

Le ferraillage vertical obtenu est :

| | | | |
|---|---|---|---|
| $\rho v$min | 0,002 | Av (cm²) | 30,5 |
| La section est de 30,5 cm², soit 15,25cm² sur chaque côté. Donc on aura 31HA8 e = 16 cm sur chaque face. | | | |

*Tableau 41: Ferraillage vertical de V4*

### *III.2. Ferraillage horizontales parallèles aux faces du mur :*

Les armatures horizontales parallèles aux faces du mur sont distribuées de façon uniforme sur la totalité de la longueur du mur; elles sont retournées aux extrémités du mur et aux bords libres qui limitent les ouvertures sur son épaisseur.

Leur pourcentage minimal est :

$$\rho h \geq max[0{,}001\ ; \frac{2}{3}\ \rho v] \qquad \text{Équation 27}$$

Le RPS2000 fixe ce pourcentage à 0,2% de la section.

| | | | |
|---|---|---|---|
| $\rho h$ min | 0,002 | Ah (cm²) | 15,75 |
| La section est de 15,75 cm², soit 7,9cm² sur chaque côté. Donc on aura 16T8 sur chaque face e = 20cm ; | | | |

*Tableau 42: Ferraillage horizontal*

### III.3. Vérification :

Nous définissons :

- Le pourcentage des armatures de flexion : $\omega f = 100\left(\frac{Af}{ab}\right)$ ;
- La contrainte normale de compression : $\sigma = \frac{Nu}{ab}$ ;
- Le paramètre d'excentricité : $\alpha_N = \frac{M}{bN}$ ;
- L'effort tranchant de calcul : $V^* = \frac{V(1+K)}{2}$ ;
- Le paramètre d'élancement : $\alpha_v = \frac{M}{bV^*}$


LAHSAINI HANAE www.cours-genie-civil.com BAKHARI MOHAMMED

Nous calculons par la suite :

- le moment limite Mlim de fissuration systématique en flexion composée :

$$M_{lim} = \frac{ab^2}{6}\left(\sigma + \frac{ft28}{1,5}\right) \qquad \text{Équation 28}$$

- Le cisaillement conventionnel associé : $\tau 1 = \tau^* . \frac{M_{lim}}{M}$ *Équation 29*

- La contraite limite de résistance à l'effort tranchant :

$$\tau 2 = 0,45\sqrt{ft28(ft28 + \frac{2}{3}\sigma)} \qquad \text{Équation 30}$$

- La contraite limite de résistance à l'effort tranchant après fissuration compte tenu des armatures longitudinales :

$$\tau 3 = min(\tau 1, \tau 2) * (1 + 3\omega f) + 0,15\sigma \qquad \text{Équation 31}$$

- La contrainte limite : $\tau lim = max(\tau 3, 0,5 ft28)$ *Équation 32*

La condition $\tau^* \leq \tau lim$ est vérifiée, nous n'avons donc pas besoin de prévoir des armatures d'effort tranchant.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $\omega f$(%) | 0,033 | ft28 (MPa) | 2,4 | $\sigma$ (MPa) | 8,970 |
| $\alpha_N$ | 0,041 | $V^*$(MN) | 2,112 | $\tau^*$(MPa) | 1,385 |
| $\alpha_v$ | 0,2631 | $Mlim$(MN.m) | 16,389 | $\tau 1$(MPa) | 6,695 |
| $\tau 2$(MPa) | 2,018 | $\tau 3$(MPa) | 3,485 | $\tau lim$(MPa) | 3,485 |

*Tableau 43: Résultats de vérification*

## IV. Radier :

### IV.1. *Epaisseur du radier* :

L'épaisseur du radier est calculée à l'aide de la formule de vérification de sa résistance au poinçonnement des voiles en dessus, nous devons donc avoir :

$$N_u \leq 0,045 * uc * e * fc28 \qquad \text{Équation 33}$$

Avec :

$$\begin{cases} N_u : \text{l'effort normal à la base de chaque voiles dans le cas ELU} \\ \text{Uc : périmètre du voile considéré} \\ e : l'épaisseur du radier \end{cases}$$

Pour une épaisseur initial e = 0,7 m nous obtenons les résultats suivants :

| Voile | Nu (MN) | Longueur (m) | Epaisseur (m) | Uc (m) | Epaisseur du radier (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| V1 | 5,56 | 3,65 | 0,2 | 10,5 | 0,39 |
| V2 | 6,39 | 3,65 | 0,2 | 10,5 | 0,45 |
| V3 | 6,43 | 4,55 | 0,2 | 12,3 | 0,39 |
| V4 | 12,42 | 6,1 | 0,2 | 15,4 | **0,60** |
| V5 | 6,42 | 4,55 | 0,2 | 12,3 | 0,39 |
| V6 | 5,7 | 3,65 | 0,2 | 10,5 | 0,40 |
| V7 | 5,27 | 3,65 | 0,2 | 10,5 | 0,37 |
| V8 | 13,92 | 20,07 | 0,2 | 43,34 | 0,24 |
| V9 | 10,01 | 5,9 | 0,2 | 15 | 0,49 |
| V10 | 5,7 | 3,35 | 0,2 | 9,9 | 0,43 |
| V11 | 6,62 | 3,35 | 0,2 | 9,9 | 0,50 |
| V12 | 6,74 | 3,35 | 0,2 | 9,9 | 0,50 |
| V13 | 7,26 | 3,35 | 0,2 | 9,9 | 0,54 |
| V14 | 10,97 | 5,9 | 0,2 | 15 | 0,54 |
| V15 | 2,95 | 1,87 | 0,2 | 6,94 | 0,31 |
| V16 | 2,51 | 1,87 | 0,2 | 6,94 | 0,27 |

*Tableau 44: Epaisseur du radier sous noyau*

Nous optons donc pour une épaisseur de **0,7 m**.

### *IV.2. Vérification de la surface du radier :*

Avant de commencer le dimensionnement, il serait judicieux de s'assurer que le sol en place supporte effectivement les charges appliquées au niveau du noyau.
Pour cela nous comparons la contrainte admissible du sol à la charge totale apportée par les voiles :
La surface minimale du radier est :

$$S_{radier} \geq \frac{N_S}{\sigma_{sol}} \qquad \text{Équation 34}$$

Avec : $N_s$ : l'effort normal transmis aux fondations dans le cas ELS

Nous considérons une épaisseur de 0,5m de terre ; Nous obtenons donc les charges suivantes :

| | |
|---|---|
| **Poids du radier (MN)** | 4,375 |
| **Poids de terre (MN)** | 2,75 |
| **∑ N els (MN)** | 82,9 |
| **Ns (MN)** | 90,025 |

Tableau 45: Charges transmises aux fondations du radier

$$S_{radier} = 250\ m^2 \geq \frac{90{,}025}{0{,}8} = 112{,}53\ m^2$$

La surface du radier respecte bien la contrainte admissible du sol.


www.cours-genie-civil.com

### *IV.3. Vérification du soulèvement :*

- *Cas statique :*

Pour qu'il n'y a pas de risque, il faut vérifier que l'effort N est dans le tiers central du radier, et donc vérifier que $e = \frac{M}{N} \leq \frac{L}{6}$ et ce dans les deux sens X et Y.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Mx (MN.m) | 0,978 | My (MN.m) | 2,262 | VERIFIE |
| ex (m) | 0,011 | ey (m) | 0,025 | |
| Lx/6 (m) | 1,667 | Ly/6 (m) | 4,167 | |

*Tableau 46: Vérification du soulèvement/ Cas statique*

- *Cas sismique :*

A la condition précédente s'ajoute le moment Mxy, l'excentrement a donc pour expression : $e = \frac{M+Mxy}{N}$

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Mxy(MN.m) | 1,014 | Mxy(MN.m) | 1,287 | VERIFIE |
| ex (m) | 0,022 | ey (m) | 0,039 | |
| ex,lim (m) | 1,667 | ey,lim (m) | 4,167 | |

*Tableau 47: Vérification du soulèvement/ Cas sismique*

Le calcul sera fait par la méthode de répartition trapézoïdale, laquelle considère que la réaction du sol sous le radier a une répartition trapézoïdale. Il s'agit de la méthode la plus utilisée pour des raisons de simplification mais elle ne constitue qu'une approximation de la répartition réelle des contraintes sous le radier.

### *IV.4. Ferraillage du radier :*

Le radier est divisé en plusieurs panneaux (ou zones); chaque panneau est considéré comme une dalle pleine renversée appuyée sur quatre cotés.

| **SENS X (-)** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zone | Mu (MN.m/m) | μ < 0,372 | α | z (m) | A (cm²)/m | Nbr | D | Esp (cm) |
| Z1 | 0,23 | 0,033 | 0,160 | 0,599 | 8,83 | 6 | 14 | 16 |
| Z2 | 0,08 | 0,011 | 0,057 | 0,625 | 8,13 | 6 | 14 | 16 |

| **SENS Y (-)** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zone | Mu (MN.m/m) | μ < 0,372 | α | z (m) | A (cm²)/m | Nbr | D | Esp |
| Z1 | 0,22 | 0,032 | 0,153 | 0,601 | 8,42 | 6 | 14 | 16 |
| Z2 | 0,16 | 0,023 | 0,112 | 0,611 | 8,13 | 6 | 14 | 16 |

| SENS X (+) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zone | Mu (MN.m/m) | μ < 0,372 | α | z (m) | A (cm²)/m | Nbr | D | Esp |
| Z1 | 0,23 | 0,033 | 0,160 | 0,599 | 8,83 | 6 | 14 | 16 |
| Z2 | 0,17 | 0,024 | 0,119 | 0,609 | 8,13 | 6 | 14 | 16 |

| SENS Y (+) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zone | Mu (MN.m/m) | μ < 0,372 | α | z (m) | A (cm²)/m | Nbr | D | Esp |
| Z1 | 0,44 | 0,063 | 0,296 | 0,564 | 17,94 | 6 | 20 | 16 |
| Z2 | 0,33 | 0,046 | 0,226 | 0,582 | 13,04 | 7 | 16 | 14 |

*Tableau 48: Ferraillage du radier*

## V. Dalle :

### *V.1. Méthode de calcul :*

Nous présentons dans ce qui suit le calcul d'un panneau de la dalle suivant l'annexe E4 des Règles BAEL91. Les piliers sont pourvus, à chaque étage, de têtes épanouies, appelés « chapiteaux ». (Le calcul sans chapiteaux est présenté en annexe).

Les piliers sont circulaires ; les calculs sont donc effectués avec les dimensions fictives : $a = b = \sqrt{S} = \sqrt{\pi}R$.

### *V.2. Conditions d'application :*

L'application des règles faisant l'objet de cette étude est limité aux cas où les conditions suivantes sont simultanément vérifiées :

- Le bâtiment est à un ou plusieurs étages ;
- Les planchers sont constitués par des dalles continues d'épaisseur constante sans nervures supportées directement par des piliers, sauf éventuellement sur leurs rives, le long desquelles peuvent exister des murs porteurs ou des poutres en saillie au-dessous des dalles ;
- Les dalles peuvent éventuellement être prolongées en porte à faux au-delà des piliers de rive ;
- Tous les piliers intérieurs sont supposés identiques, de section transversale rectangulaire a × b ;
- Les piliers le long d'une rive (tous identiques à l'exception des piliers d'angle) ont des sections transversales rectangulaires au moins égales à ab/2 ;
- Les piliers d'angle ont des sections transversales rectangulaires identiques, d'aire au moins égale à a/2 × b/2 ;
- Les dimensions des chapiteaux doivent vérifier : $\begin{cases} a' \leq 0{,}4lx \\ b' \leq 0{,}4ly \end{cases}$

$lx$ Et $ly$ désignant les dimensions de celui des quatre panneaux entourant le pilier considéré qui a la plus faible surface.

- Les inégalités suivantes doivent être respectées :

$$\begin{cases} \frac{ly}{2} \leq lx \leq 2ly \\ \frac{b}{2} \leq a \leq 2b \\ \frac{b'}{2} \leq a' \leq 2b' \\ a \leq \frac{lx}{5} \quad et \quad b \leq \frac{ly}{5} \end{cases}$$

**Ces conditions sont vérifiées dans le cas de notre plancher.**

### *V.3. Notations :*

- $\ell_t$ la portée (avec indice x ou y) du panneau entre axes des piliers dans le sens X ou Y ;
- c' la dimension du chapiteau (a' ou b') mesurée suivant la même direction que $\ell_t$ ;
- $h_2$ la hauteur du chapiteau; h l'épaisseur de la dalle ;
- $h_s$, $h_n$ les hauteurs des piliers inférieurs et supérieurs mesurées entre faces supérieures des planchers ;
- p la charge évaluée par mètre linéaire de bande de dalle constituant la traverse horizontale du portique ;
- I le moment d'inertie de cette même bande ;
- $I_s$, $I_n$ les moments d'inertie de la section courante des piliers inférieurs et supérieurs ;
- $\lambda_h$, $\lambda_\ell$ les paramètres géométriques définis par les relations : $\lambda h = \frac{h2}{hs} \;\; et \;\; \lambda l = \frac{lt - c\prime}{lt}$ .

### *V.4. Calcul des sollicitations :*

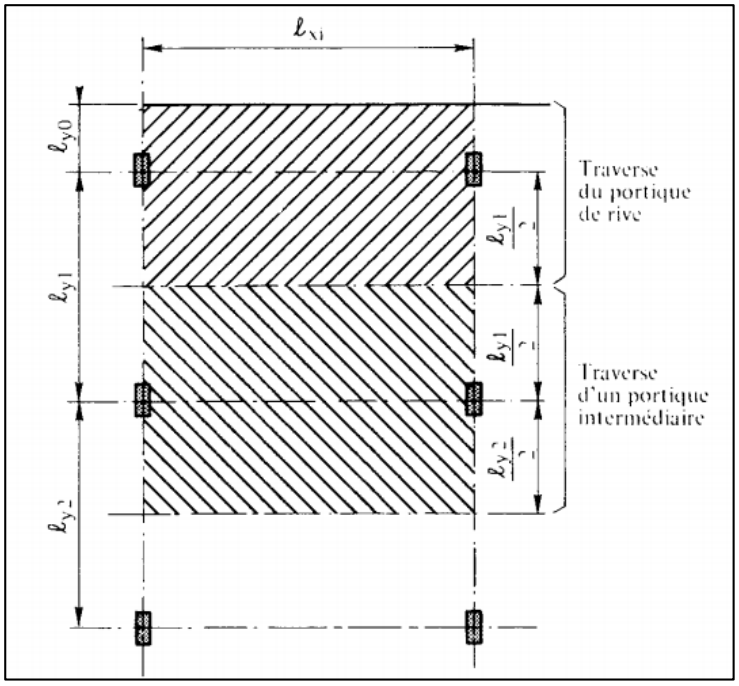
Le cas de notre plancher vérifie aussi les conditions suivantes :

- le rapport $\ell_x/\ell_y$ des deux dimensions des panneaux et celui a/b des deux dimensions des piliers rectangulaires sont compris entre 2/3 et 3/2 ;
- les portées $\ell_x$ (ou $\ell_y$) de deux panneaux successifs ne différent pas de plus de 30% ;
- la résistance aux forces horizontales est assurée par une structure rigide (murs-pignons, façades, refends, palées) distincte de celle du plancher ;
- Les paramètres géométriques $\lambda h \;\; et \;\; \lambda l$ doivent vérifier : $\lambda h \leq 0{,}3 \;\; et \;\; \lambda l \geq 0{,}6$.

Nous pouvons ainsi appliquer la méthode dite **approchée** pour le calcul des sollicitations.

Nous étudions indépendamment l'une de l'autre les flexions dans les sens X et Y des panneaux constituant le plancher et cela, en prenant en compte chaque fois la totalité des charges permanentes et des charges d'exploitation correspondant au cas de charge considéré.

Chaque portique est étudié comme un système à deux dimensions composé de montants verticaux constitués par les piliers et de traverses horizontales définies de la façon suivante :




- Pour un portique intermédiaire X (ou Y), les traverses sont constituées par la bande de dalle limitée par les lignes des centres des panneaux situés de part et d'autre du portique considéré ;
- Si ces panneaux ont des portées différentes y1 et y2 (ou x1 et x2, la largeur de cette bande est égale à : $\frac{ly1+ly2}{2}$ $pour\ un\ portique\ X$ $(et\ \frac{lx1+lx2}{2}\ pour\ un\ portique\ Y)$
- Pour un portique de rive X (ou Y) les traverses sont les éléments de plancher de largeur : $\frac{ly1}{2} + ly0\ \left(ou \frac{lx1}{2} + lx0\right)$.
- Les valeurs des coefficients K de rigidité sont données par les relations :

$$Kw = \frac{I}{\lambda_{lw} l'_w} \quad ; \quad Ke = \frac{I}{\lambda_{le} l'_e} \qquad \text{Équation 35}$$

Le coefficient $\lambda_l$ permet d'introduire les portées entre nus d'appuis. Le nœud de rive (avec console) est étudié en faisant $Kw = 0$. « Article E.2.4,21/ BAEL91 »

$$Ks = \frac{2}{3}\frac{Is(1+4\lambda h)}{h\prime s} \qquad \text{Équation 36}$$

$$Kn = \frac{2}{3}\frac{In}{h'n}(1 + \frac{\lambda h}{2}) \qquad \text{Équation 37}$$

- 2/3 Pour tenir compte des dimensions relatives des bandes de dalle et de poteaux ;
- $\lambda h$ Pour tenir compte de la présence de chapiteaux éventuels ;
- Nous évaluons les moments de référence en appliquant la relation suivante :

$$M' = \frac{pl'^2}{8{,}5}(1{,}5 - \frac{\lambda_l{}^2}{2}) \qquad \text{Équation 38}$$

- Nous définissons au-dessus et au-dessous de chaque appui des tronçons fictifs de poteaux, de hauteurs $h'_n$ et $h'_s$ étant égal :
  - A neuf dixième de la hauteur $h_n$ (0,9 $h_n$) si le nœud considéré appartient à l'avant-dernier plancher ;
  - Et à 0,8 $h_n$ dans les autres cas ;
  - A $h_s$ dans le cas où les poteaux sont articulés sur leurs fondations.

- Nous définissons de même, de chaque côté des appuis, des travées fictives dont les longueurs (désignées ℓ' par avec indices « W » ou « e ») sont précisées comme suit :

$$l' = \begin{cases} l \ pour \ une \ console \\ 0{,}8l \ pour \ une \ travée \ intermédiare \\ \chi_1 l_{w2} \ pour \ un \ noeud \ voisin \ du \ noeud \ de \ rive \\ \chi_3 l_{e2} \ \ pour \ un \ appui \ de \ rive \end{cases}$$ *Équation 39*

Les coefficients $\chi 1 \ et \ \chi 3$ sont compris entre 0,8 et 1 et sont définis comme suit :

$$\begin{cases} \chi_1 = 0{,}8 & pour \ Ks1 + Kn1 \geq 1{,}5Ke1 \\ \chi_1 = 1 - \frac{Ks1+Kn1}{7{,}5Ke1} & Pour \ Ks1 + Kn1 < 1{,}5Ke1 \end{cases}$$ *Équation 40*

$$\begin{cases} \chi_3 = 0{,}8 & pour \ Ks1 + Kn1 \geq 1{,}5Kw3 \\ \chi_3 = 1 - \frac{Ks3+Kn3}{7{,}5Kw3} & Pour \ Ks1 + Kn1 < 1{,}5Kw3 \end{cases}$$ *Équation 41*

- Les moments dans les sections dangereuses (nus des appuis) sont, en valeur absolue :

  - Au nu de l'appui dans la travée de gauche :

$$M_w = M'_e \frac{Kw}{D} + M'_w \left(1 - \frac{Kw}{D}\right)$$ *Équation 42*

Avec : $D = Kw + Ke + Ks + Kn$

  - Au nu de l'appui dans la travée de droite :

$$M_e = M'_e \left(1 - \frac{Ke}{D}\right) + M'_w \frac{Ke}{D}$$ *Équation 43*

  - Au nu inférieur des poutres dans le poteau inférieur :

$$M_s = \frac{Ks}{D}(M'_e - M'_w)$$ *Équation 44*

  - Au nu supérieur des poutres dans le poteau supérieur :

$$M_n = \frac{Kn}{D}(M'_e - M'_w)$$ *Équation 45*

## *V.5. Vérification de conditions de résistance aux moments fléchissant :*

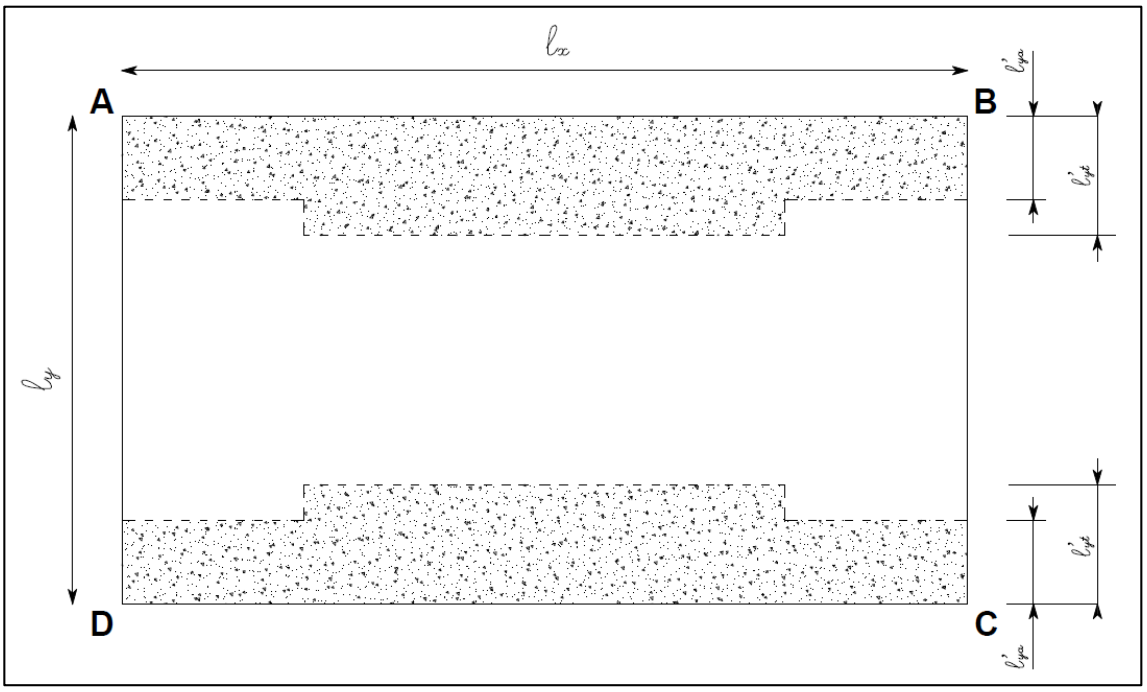
Pour ce faire, chaque panneau est décomposé en bande dont les dimensions sont :

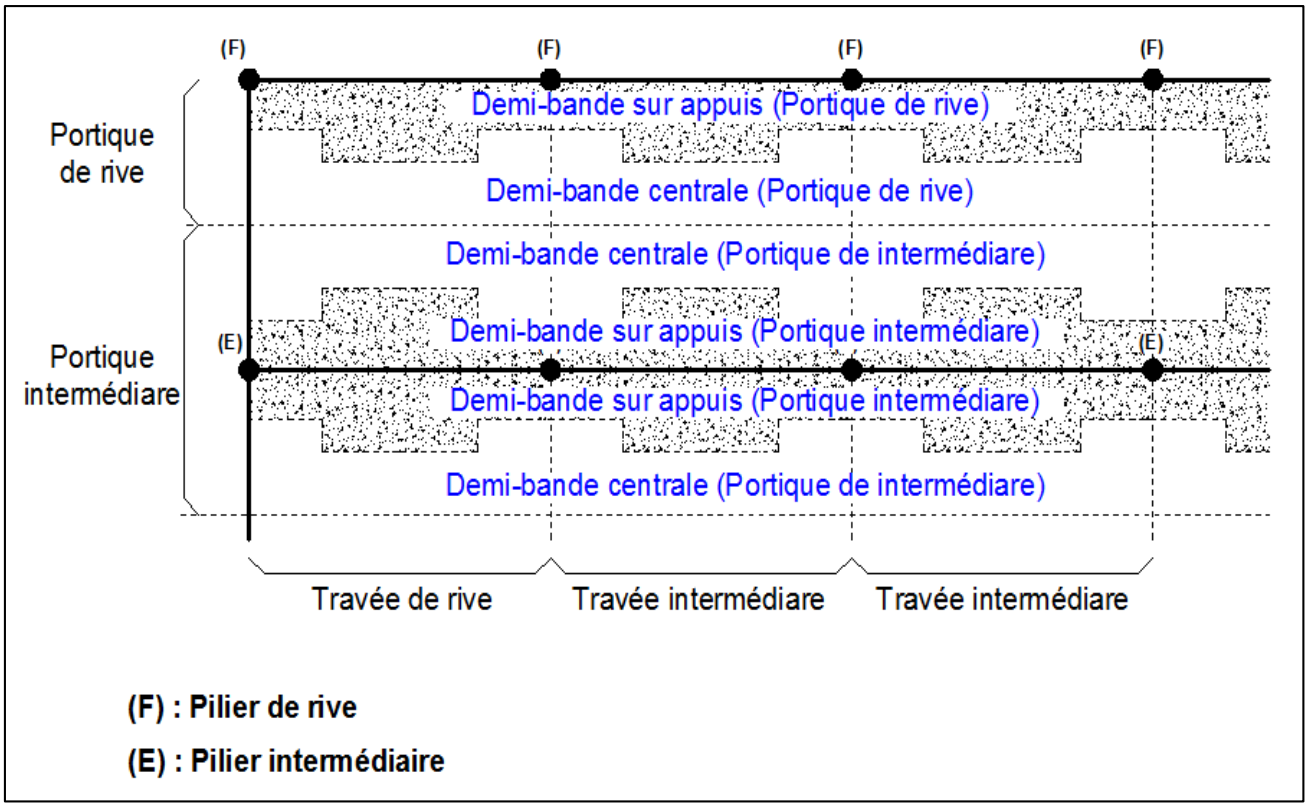
- Pour l'évaluation de la résistance de la dalle aux moments sur appuis :

$$l'_a = max(\frac{b'}{2} + h; 1{,}5(\frac{b}{2} + h))$$ *Équation 46*

- Pour l'évaluation de la résistance de la dalle aux moments sur travées :

$$l'_t = max(\frac{b'}{2} + h\,;1{,}5\left(\frac{b}{2} + h\right) + \frac{lx}{10}) \qquad \text{Équation 47}$$



Les moments sont donc répartis en tenant compte des coefficients suivants :

| Demi-bande considérée | | Moments positifs | Moments négatifs au voisinage d'un pilier intérieur (E) | Moments négatifs au voisinage d'un pilier de rive (F) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Rive non supportée | Rive supportée |
| Demi-bande centrale d'un portique intermédiaire (A) | | 0,2 (Mu) | 0,12 (M'u) | 0,10 (M'u) | 0,20 (M'u) |
| Demi-bande centrale d'un portique de rive (B) | | 0,4 (M1u) | 0,24 (M'1u) | 0,20 (M'1u) | 0,40 (M'1u) |
| Demi-bande sur appui d'un portique intermédiaire (C) | | 0,3 (Mu) | 0,38 (M'u) | 0,40 (M'u) | 0,30 (M'u) |
| Demi-bande sur appuis d'un portique de rive (D) | Rive non supportée | 0,60 (M1u) | 0,76 (M'1u) | 0,80 (M'1u) | 0,60 (M'1u) |
| | Rive supportée | 0,30 (M1u) | 0,38 (M'1u) | 0,40 (M'1u) | 0,30 (M'1u) |

*Tableau 49: Coefficientt de répartition des moments*

- ($M_u$) et ($M'_u$) représentent respectivement les valeurs absolues maximales des moments positifs et négatifs sollicitant une travée quelconque d'un portique intermédiaire ;
- ($M_{1u}$) et ($M'_{1u}$) représentent respectivement les valeurs absolues maximales des moments positifs et négatifs sollicitant un portique de rive.

Condition de non-fragilité :

« Dans toute poutre comportant une zone tendue, qu'elle soit soumise à la flexion simple ou composée, les armatures longitudinales de traction doivent présenter une section au moins égale à 0,001 de la section droite de la poutre. » Article B.6.4 des règles BALE91.

Nous devons donc avoir : $$\frac{A_{x,y}}{l'_{y,x}h} \geq 0{,}001\frac{400}{f_e}$$

Avec : $\begin{cases} A_{x,y}: section\ d'armaturedans\ la\ demi-bande\ de\ largeur\ l'_{y,x} \\ h: épaisseur\ de\ la\ dalle \end{cases}$

Nous calculons par la suite :

$$Asup = max\begin{cases} \frac{A_x}{l_y - 2l'_{yt}} \\ \frac{A_y}{l_x - 2l'_{xt}} \end{cases} \qquad Ainf = min\begin{cases} \frac{A_x}{l_y - 2l'_{yt}} \\ \frac{A_y}{l_x - 2l'_{xt}} \end{cases} \qquad \text{Équation 48}$$

Avec : $A_x et\ A_y$ les sections d'armatures de la dmi-bande centrale.

Le rapport Ainf/Asup doit être supérieur à ¼ dans le cas de charges uniformément réparties.


LAHSAINI HANAE www.cours-genie-civil.com BAKHARI MOHAMMED

## V.6. Vérification des conditions de résistance aux efforts tranchants :

Les vérifications concernant la résistance de la dalle aux efforts tranchants sont effectuées dans les sections correspondant au contour du chapiteau et dans les deux sens X et Y ; Dans ce qui suit nous présentons les vérifications dans le sens X.

Soit $V"_{xu}$ les efforts tranchants au niveau de ces sections dans le sens X.

Les efforts tranchants à prendre en compte sont évalués par la formule suivante :

$$V"_{oxu} = V"_{xu} \frac{ly+b'}{2ly} \qquad \text{Équation 49}$$

Avec : $ly = \frac{lyw+lye}{2}$ $et$ $lx = \frac{lxw+lxe}{2}$

Il n'y a pas lieu de prévoir d'armatures transversales, si les conditions suivantes sont satisfaites :

$$V"_{oxu} \leq \frac{0,05}{\gamma b} fc28(b' + h)d \qquad \text{Équation 50}$$

Avec : d désignant la hauteur utile dans la section d'épaisseur totale h.


LAHSAINI HANAE www.cours-genie-civil.com BAKHARI MOHAMMED

# CHAPITRE 6 : ETUDE ET TRAITEMENT THERMIQUE DU BÂTIMENT

## I. Bilan thermique :

Un bilan thermique permet de déterminer les besoins en chauffage et en climatisation. C'est un calcul qui se base surtout sur le calcul des déperditions thermiques qui, malgré la complexité de certaines formules, est assez simple et précis car les données d'entrée sont connues avec assez de précision. La partie délicate est de connaître les différents apports gratuits, internes ou externes. Les apports internes (occupants, lumières, appareils ménager et autres, etc.) sont fonction du nombre d'occupants, de leurs comportements et de leur mode de vie. Les apports externes sont principalement les apports solaires (qui sont comptés seulement sur les parties vitrées, menuiserie comprise). Ces apports sont difficiles à quantifier, c'est pour cette raison que l'on utilise des valeurs par défaut et des estimations approximatifs.

En plus de bilan, nous trouvons aussi l'inertie du bâtiment qui joue un rôle sur le confort des occupants. C'est un paramètre important qui entre aussi en ligne de compte et peut être de 5 classes, classe d'inertie très légère, légère, moyenne, lourde et très lourde

### *I.1. Charges internes :*

#### I.1.1. Apport des occupants :

L'homme apporte une chaleur sensible (par notre corps à 37°C) et une chaleur latente (par notre production de vapeur d'eau en respiration et transpiration).

| Activités | Application | Température ambiante (°C) | | | | | | Emission thermique totale (W) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 25°C | | 26°C | | 27°C | | |
| | | Chaleur sensible (W) | Chaleur latente (W) | Chaleur sensible (W) | Chaleur latente (W) | Chaleur sensible (W) | Chaleur latente (W) | |
| Assis au repos | Ecole, théâtre | 65 | 37 | 62 | 40 | 60 | 42 | 102 |
| Travail léger | Bureau, hôtel, appartement | 67 | 49 | 63 | 59 | 56 | 60 | 116 |
| Debout, marche lente | Magasin, boutique | 68 | 63 | 63 | 68 | 57 | 74 | 131 |
| Repas | Restaurant | 77 | 84 | 71 | 90 | 64 | 97 | 161 |
| Travail facile | atelier | 80 | 140 | 72 | 148 | 67 | 153 | 220 |
| Travail difficile | Usine | 149 | 277 | 142 | 284 | 136 | 290 | 426 |

*Tableau 50: Chaleur dégagée par les personnes*


www.cours-genie-civil.com

Le flux de chaleur qui en résulte se calcul par application de la formule suivante :

$$Q_{occ} = N \times (H_{sen} + H_{lat}) \times T \ [Wh] \qquad \text{Équation 51}$$

Avec : $\begin{cases} N : Nombre\ des\ occupants \\ H_{sen} : Chaleur\ sensible\ des\ occupants\ en\ W \\ H_{lat} : Chaleur\ latente\ des\ occupants\ en\ W \end{cases}$

### I.1.2. Apports de l'éclairage :

Il constitue une source de chaleur sensible et dépend du type de lampe et du système d'éclairage. Pour les immeubles de bureaux, il y a 5 principaux systèmes d'éclairage à considérer :

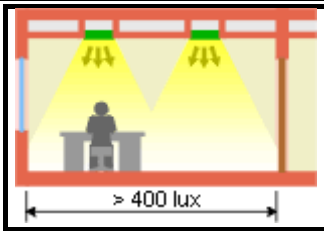
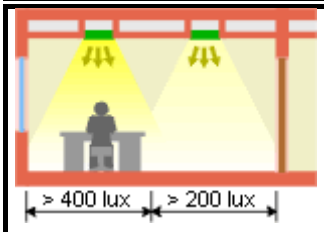
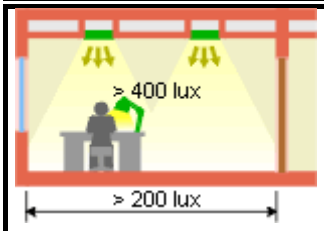
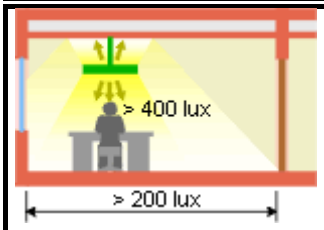
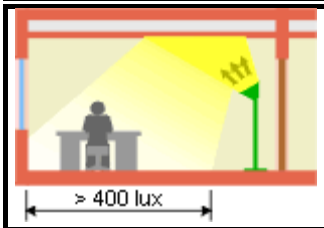
| | |
|---|---|
|  | **Éclairage général : 12 - 14 W/m²**<br><br>Éclairage uniforme via des luminaires encastrés dans le plafond. La reprise d'air par les luminaires permet de diminuer la charge interne. |
|  | **Éclairage général par zone : 10 - 12 W/m² (on peut aujourd'hui descendre jusqu'à 6-9 W/m²)**<br><br>Éclairage via des luminaires encastrés dans le plafond, certaines zones de la pièce ont un éclairage plus faible. La reprise d'air par les luminaires permet de diminuer la charge interne. |
|  | **Éclairage de base et éclairage du plan de travail : 10 W/m²**<br><br>Un éclairage de base (niveau de lumière relativement bas) via des luminaires encastrés dans le plafond complété par des lampes de bureau. La reprise d'air par les luminaires permet de diminuer la charge interne. |
|  | **Éclairage ponctuel uniquement : 8 - 12 W/m²**<br><br>Luminaires au-dessus des plans de travail et fixés à un niveau inférieur à celui du plafond de sorte qu'une partie de la lumière est rayonnée vers le haut. La reprise d'air par les luminaires est impossible. |
|  | **Éclairage indirect : 20 - 25 W/m²**<br><br>La lumière est réfléchie sur le plafond. La reprise d'air par les luminaires est impossible. |

*Tableau 51: Chaleur dégagée par l'éclairage (Lampe fluorescente)*



LAHSAINI HANAE www.cours-genie-civil.com BAKHARI MOHAMMED

La quantité de chaleur est :

$$Q_{ecl} = N \times H_l \times S \times T \ [Wh] \qquad \text{Équation 52}$$

Avec : $\begin{cases} N : Nombre\ des\ lampes \\ H_l : Chaleur\ sensible\ dégagée\ par\ une\ lampe\ en\ W \\ S : Surface\ du\ plafond\ en\ m^2 \\ T : Durée\ de\ la\ saison\ de\ calcul\ en\ h \end{cases}$

### I.1.3. Apport des équipements :

Si la consommation des nouveaux appareils d'éclairage a été fortement réduite ces dernières années, par contre, celle des équipements informatiques de bureau a augmenté de manière spectaculaire.

Le tableau ci-dessous présente quelques exemples :

| Appareil | Puissance (W) |
|---|---|
| Unité centrale d'un PC | 50 - 60 W |
| **Écrans** | |
| Écran noir et blanc - 14 pouces | 30 - 40 W |
| Écran couleurs - 14 pouces | 50 - 70 W |
| Écran couleurs - 15 pouces | 60 - 90 W |
| Écran couleurs - 17 pouces | 70 - 100 W |
| Écran couleurs - 21 pouces | 110 - 160 W |
| **Imprimantes** | |
| Imprimante à jet d'encre | 20 - 60 W (puissance en attente : 10 W) |
| Imprimante laser | 150 - 250 W (puissance en attente : 70 W) |
| **Fax** | |
| Fax thermique | 0.3 - 0.7 Wh / page A4 (en attente 5 - 10 W) |
| Fax laser | 1.4 - 2.6 Wh / page A4 (en attente 60 - 70 W) |
| Fax jet d'encre | 0.3 Wh / page A4 (en attente 4 W) |
| **Photocopieurs** | |
| Photocopieuse 20 pages / minute | 1 000 W (en attente 150 W) |
| Photocopieuse 40 pages / minute | 1 500 W (en attente 350 W) |

*Tableau 52: Puissance de quelques appareils informatiques*

Nous avons donc la quantité :

$$Q_{eq} = \sum_i N_i \times H_i \times T \ [Wh] \qquad \text{Équation 53}$$

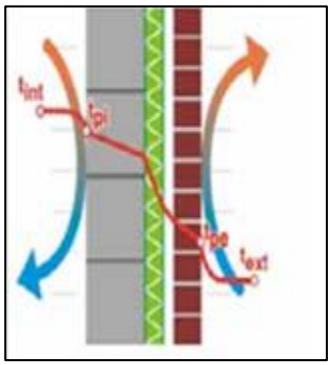
Avec : $\begin{cases} Ni : Nombre\ de\ l'équipement\ i \\ H_i : Chaleur\ sensible\ dégagée\ par\ l'équipement\ i\ en\ W \\ T : Durée\ de\ la\ saison\ de\ calcul\ en\ h \end{cases}$


www.cours-genie-civil.com

## I.2. Charges externes :

### I.2.1. Apport de chaleur par transmission surfacique :

L'évaluation de ces apports consiste à calculer le coefficient de transmission surfacique U (W/m² °C) des éléments considérés.



Il a pour expression :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum\frac{e}{\lambda} + R_a + \frac{1}{h_i}} \qquad \text{Équation 54}$$

Avec :

$$\begin{cases} h_e \text{ et } h_i \text{ les coefficients d'échanges superficiels} \\ e \text{ et } \lambda \text{ l'épaisseuret la conductivité de la couche homogène} \\ R_a \text{ la résistance de la couche non homogène} \end{cases}$$

Nous présentons dans le tableau suivant les valeurs de coefficient d'échange :

| | Paroi en contact avec l'extérieur | | | Paroi en contact avec un autre local | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1/hi** | **1/he** | **1/hi+1/he** | **1/hi** | **1/he** | **1/hi+1/he** |
| Paroi verticale>60° avec le plan horizontal | 0,11 | 0,06 | 0,17 | 0,11 | 0,11 | 0,22 |
| Paroi horizontale<60° avec le plan horizontal flux ascendant | 0,09 | 0,05 | 0,14 | 0,09 | 0,09 | 0,18 |
| Paroi horizontale<60° avec le plan horizontal flux descendant | 0,17 | 0,05 | 0,22 | 0,17 | 0,17 | 0,34 |

*Tableau 53: Valeurs des coefficients d'échanges superficiels*

L'apport résultant est donc :

$$Q_{tr} = U * S \ [W/K] \qquad \text{Équation 55}$$

Avec :

$$\begin{cases} U : Coefficient\ de\ transmission\ surfacique\ de\ la\ paroi\ considérée\ (W/m^2.k) \\ S : surface\ de\ la\ paroi\ considérée\ (m^2) \end{cases}$$

### I.2.2. Apport de chaleur par transmission linéique :

Ces apports se produisent principalement au niveau des ponts thermiques.


LAHSAINI HANAE www.cours-genie-civil.com BAKHARI MOHAMMED

En effet, un pont thermique est une partie de l'enveloppe du bâtiment où la résistance thermique est modifiée de façon sensible par :

- La pénétration totale ou partielle de l'enveloppe du bâtiment par des matériaux ayant une conductivité thermique différente, comme par exemple les systèmes d'attaches métalliques qui traversent une couche isolante ;
- Un changement local de l'épaisseur des matériaux de la paroi, ce qui revient à changer localement la résistance thermique ;
- Une différence entre les surfaces intérieure et extérieure, comme il s'en produit aux liaisons entre parois ;
- Entre éléments de construction non isolés et éléments de construction isolés.

Nous les retrouvons généralement au droit des jonctions parois / plancher.

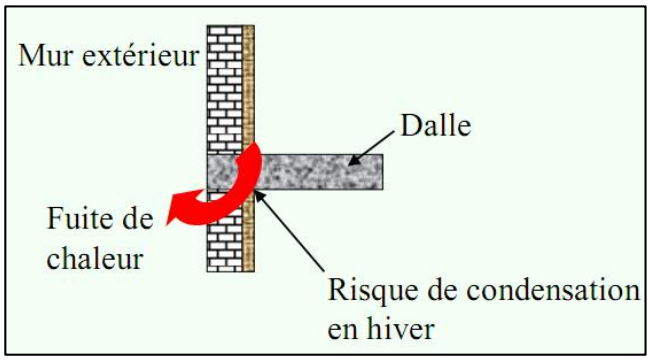



*Figure 11: Pont thermique*

Les ponts thermiques linéaires sont exprimés par un coefficient linéique $\psi$ en W/(m.K) qui caractérisent les déperditions à la jonction de deux parois (2D) (exemple : liaison en partie courante entre un plancher et un mur extérieur).

Les déperditions linéiques s'expriment par la formule :

$$Q_{pt} = \sum L.\psi \ [W/K] \qquad \text{Équation 56}$$

Les ponts thermiques peuvent nuire sérieusement au comportement thermique des bâtiments. Pendant la période de chauffage, la température de la face interne d'un pont thermique est inférieure à celle des matériaux adjacents ce qui peut provoquer des condensations de surface et donc formation de fissures, moisissures et de pourriture ce qui peut se développer en donnant naissance à des contraintes qui peuvent détériorer les constructions.

Les ponts thermiques doivent faire l'objet d'une étude particulière pour pouvoir leur envisager des traitements convenables (voir chapitre 2)

### I.2.3. Apport de chaleur par renouvellement d'air :

Le renouvellement d'air dans un local climatisé est nécessaire pour raisons hygiéniques. Il se fait en règle générale par la ventilation (naturelle ou mécanique) et par infiltration, introduisant ainsi l'air dans le local considéré. Il est source d'apport de chaleur sensible dans le local à étudier.

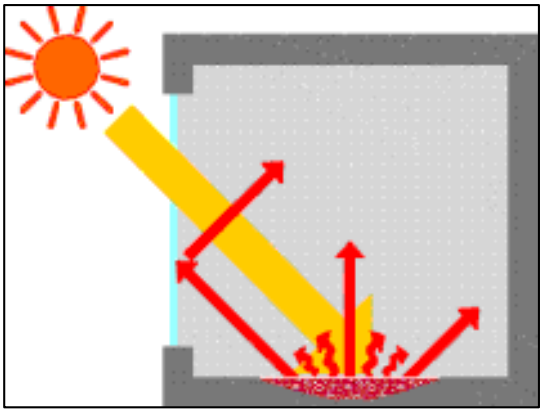
Nous définissons par la formule suivante le débit d'air renouvelé en $m^3/h$ par personne :

$$Q_r = 0{,}34 * Q * P \qquad \text{Équation 57}$$

Avec : $\begin{cases} 0{,}34 \ est \ le \ pouvoir \ calorifique \ de \ l'air \ [Wh/m^3.K] \\ P : Le \ nombre \ des \ personnes \end{cases}$

### I.2.4. Apport par effet de serre :

Le rayonnement solaire (température du soleil voisine de 6 000°C) est principalement composé de longueurs d'onde courtes, tandis que le rayonnement émis par les corps terrestres (température courante voisine de 20°C) est plutôt à grandes longueurs d'onde.



L'effet de serre provient de la transparence sélective du verre en fonction de la longueur d'onde du rayonnement. Un vitrage sera transparent pour le rayonnement solaire mais opaque pour le rayonnement en provenance des matériaux du bâtiment.

Ainsi, les rayons du soleil traversent les parois vitrées et échauffent les parois intérieures et les objets du bâtiment. Ces derniers réémettent alors la chaleur accumulée. Leur longueur d'onde étant dénaturée, ces rayons ne peuvent retraverser les parois par lesquelles ils se sont introduits ; C'est alors l'escalade des degrés.

## *I.3. Inertie thermique quotidienne du bâtiment :*

L'inertie thermique caractérise la capacité qu'a le bâtiment à absorber et restituer l'énergie thermique. L'inertie thermique peut être divisée en cinq classes : classe d'inertie très légère ; légère ; moyenne ; lourde ;très lourde.

Cette inertie quotidienne permet de définir la capacité thermique quotidienne (Cm) du bâtiment qui est ensuite utilisée pour la récupération des apports. Les valeurs de Cm sont données dans le tableau ci-dessous en fonction de la classe d'inertie (voir annexe) :

| Classe d'inertie | Cm |
|---|---|
| Très légère | 80/3,6 * Abât |
| Légère | 110/3,6 * Abât |
| Moyenne | 165/3,6 * Abât |
| Lourde | 260/3,6 * Abât |
| Très lourde | 370/3,6 * Abât |

*Tableau 54: Capacité thermique*

Abât est la surface habitable du logement.

## I.4. Consommation totale d'énergie :

### I.4.1. Besoins en chauffage :

Pour connaître les besoins de chauffage, en kWh/m², il faut définir :

- Les apports externes (solaires) et internes (Occupants, équipements, éclairage) ;
- La période ou la saison de chauffe (voir annexe) ;
- Les degrés jours de chauffage (voir annexe) ;
- La capacité thermique quotidienne (Cm) qui dépend de l'inertie thermique quotidienne ;
- Le coefficient H qui est le coefficient de déperdition du logement, en W/K : H = HT + HV.
  - HT est le coefficient de déperdition par transmission entre le volume chauffé d'une part et l'extérieur, le sol et les locaux non chauffés d'autre part en W/K ;
  - HV est le coefficient de déperdition par ventilation (renouvellement d'air voulu et parasite).

Ainsi, la formule qui permet de calculer la consommation d'énergie en période de chauffe est la suivante :

$$Q_{ch} = \frac{[[H \times 24 \times DJCH \times (T_i - T_e)] - n \times Q_G]}{1000 \times S\,HON} \qquad \text{Équation 58}$$

Avec :

$$\begin{cases} H : Coefficient\ de\ déperdition\ par\ transmission\ bu\ bâtiment, H = \sum Q_{tr} + \sum Q_{pt} + Q_r \\ DJCH : Les\ degrés\ jours\ de\ chauffage\ (°C) \\ Ti : Température\ intérieure\ de\ confort\ en\ hiver, Ti = 26°C \\ Te : Température\ extérieure\ de\ base\ hivernale\ (voir\ annexe) \\ Q_G : Apports\ de\ chaleur\ par\ les\ occupants, les\ équipements\ et\ l'éclairage \\ SHON : Surface\ hors\ oeuvre\ nette\ (m^2) \\ n : facteur\ de\ réduction\ qui\ prend\ en\ compte\ le\ comportement\ dynnamique\ du\ bâti \end{cases}$$

### I.4.2. Besoins en climatisation :

Pour connaître les besoins de climatisation, en kWh/m², il faut avoir défini les mêmes éléments précédents, en substituant respectivement les degrés jours de chauffage et la période de la saison de chauffe par les degrés jours de climatisation et la période de la saison de climatisation.

$$Q_{cl} = \frac{[[H \times 24 \times DJCL \times (T_i - T_e)] + n \times Q_G]}{1000 \times SHON} \qquad \text{Équation 59}$$

Avec :

$$\begin{cases} DJCL : Les\ degrés\ jours\ de\ climatisation \\ Ti : Température\ intérieure\ de\ confort\ en\ été, Ti = 26°C \\ Te : Température\ extérieure\ de\ base\ estivale\ (voir\ annexe) \end{cases}$$

Ainsi, la consommation totale annuelle en énergie pour le chauffage et la climatisation est :

$$Q_T = Q_{Ch} + Q_{Cl}\ [kWh/an.m^2 SHON] \qquad \text{Équation 60}$$



LAHSAINI HANAE www.cours-genie-civil.com BAKHARI MOHAMMED

# II. Développement d'un logiciel de calcul thermique « ThermoBAT v1.0 » :

## *II.1. Présentation du logiciel :*

L'outil informatique est très recommandé pour la réalisation d'un bilan thermique. Sur le marché, il existe plusieurs logiciels qui font le calcul du bilan thermique (simple ou complexe) comme : Perround, Kodyba, KoZiBox, etc. Mais ils sont adaptés plutôt à la réglementation thermique française (surtout au niveau des données météorologiques).

Ainsi, un logiciel qui permet de déterminer le bilan thermique d'un bâtiment et vérifier si ce bâtiment répond au niveau d'isolation préconisé par la RTBM demeure indispensable à toute étude surtout lorsque la réglementation entre en vigueur et devient obligatoire.

**Nous avons donc développé un outil de calcul** qui permet de mesurer l'impact de différents paramètres de la construction sur le niveau de performance énergétique de bâti et ainsi d'évaluer sa performance énergétique. Cet outil permet de déterminer la consommation en énergie en KWh/m² SHON, ce qui permet entre autre de déterminer le gain en énergie. De l'autre part et de point de vue approche perspective, notre logiciel évalue la performance de différents éléments à savoir : la toiture, les murs, les baies vitrées ainsi que les planchers intermédiaires.

Nous avons développé notre application en utilisant le langage VB.net en adoptant l'approche de la programmation orientée objet vu qu'elle présente l'avantage d'une programmation claire et abordable.

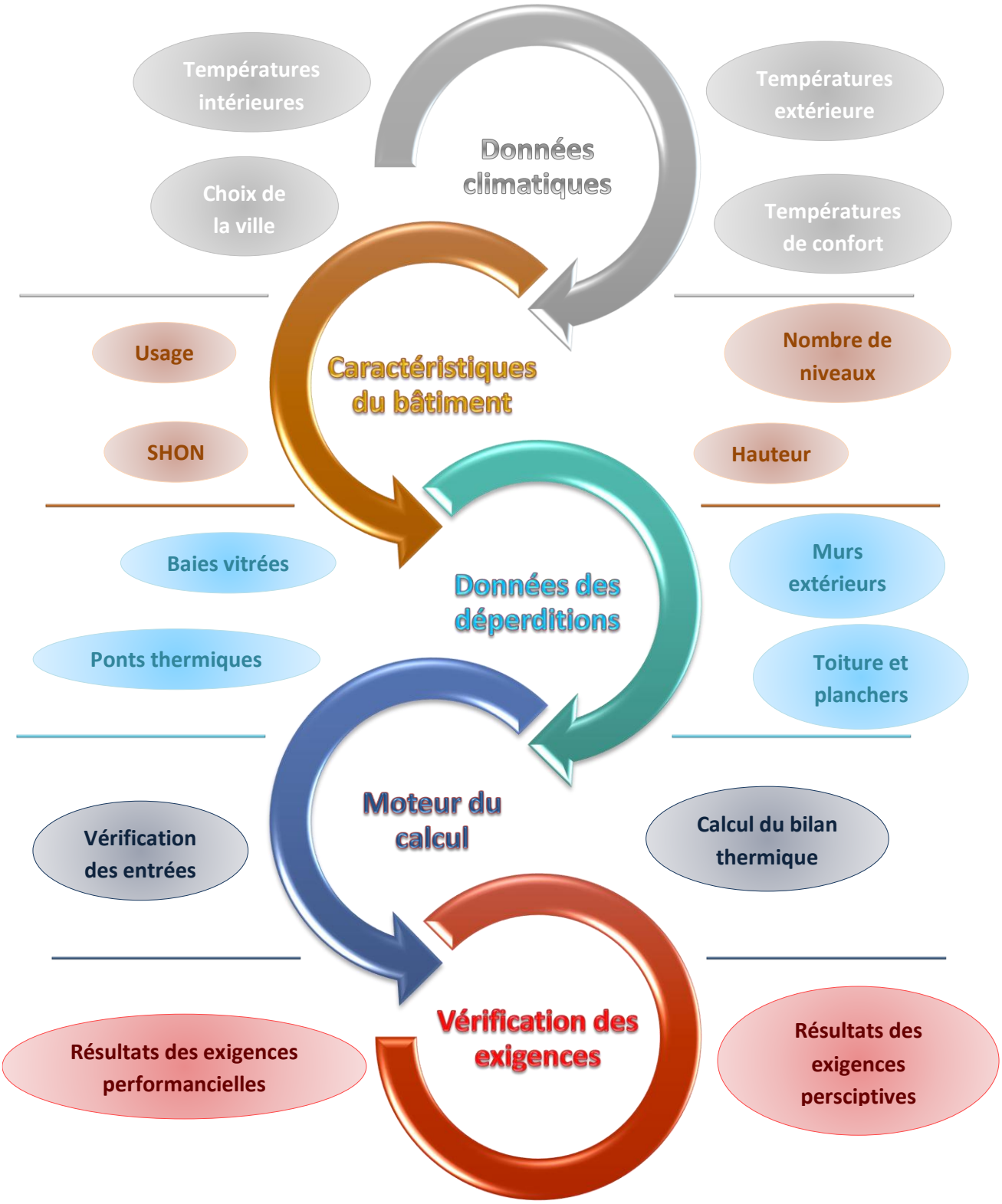
Nous avons choisi d'intituler notre logiciel « **ThermoBAT v1.0 ».** Il s'agit d'un logiciel de calcul du bilan thermique adapté à la RTBM (au niveau vérification des exigences), selon la méthode simplifié décrite ci-dessous.

ThermoBAT v1.0 permet une saisie intuitive de tous les paramètres nécessaires pour le calcul du bilan thermique, allant des données météorologiques des villes marocaines, jusqu'à la saisie des caractéristiques des parois du local (Baies vitrées, Planchers, Toiture, Murs, Façades, Ponts thermiques, etc…), outre le nombre et le type des occupants, les équipements et le type d'éclairage installé.

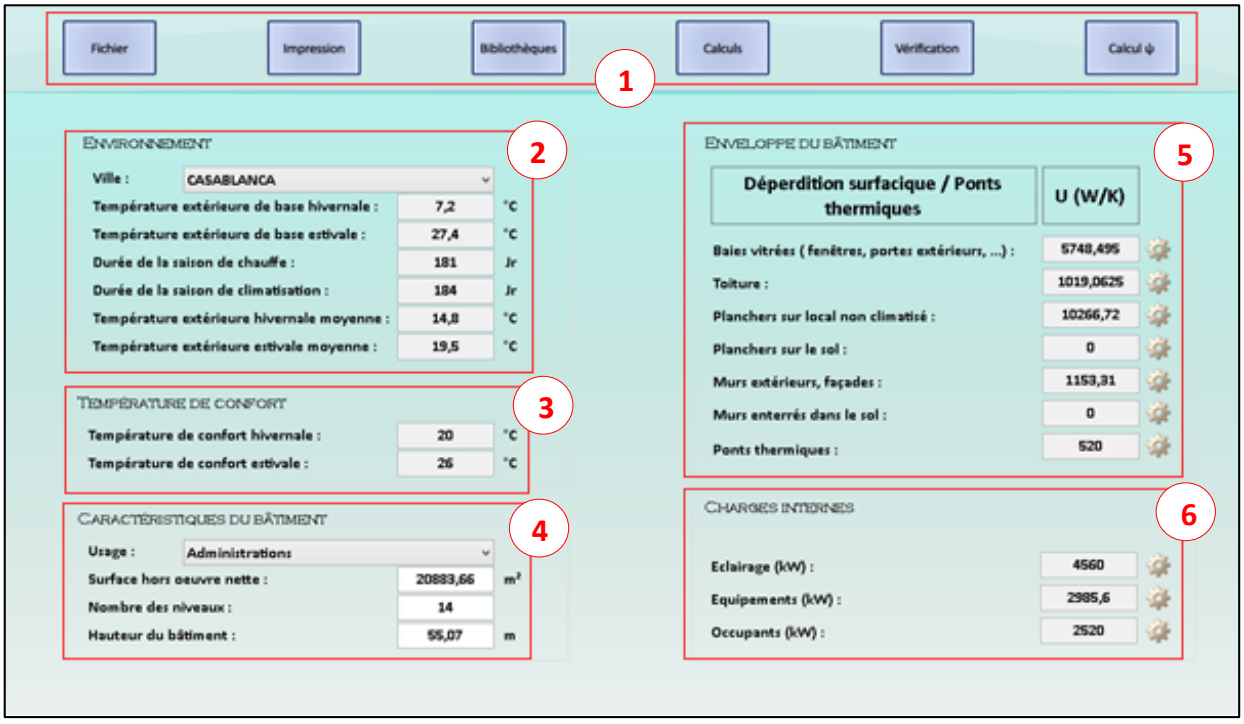
Ce logiciel contient au préalable une base de données pour le vitrage, les différentes parois du bâtiment, des matériaux… prête à l'utilisation, en facilitant aussi toute opération d'ajout ou de modification.

Il propose par la suite, une synthèse des résultats de calcul, permettant ainsi de vérifier les performances thermiques du bâtiment que ça soit au niveau performanciel (consommation totale du bâtiment en énergie), qu'au niveau prescriptif (Caractéristique de l'enveloppe du bâtiment).

### II.1.1. Schéma principe du fonctionnement du logiciel développé :



### II.1.2. Données d'entrée du logiciel :




- Espace 1 : Il s'agit d'une zone menu qui permet d'accéder à des projets existants, d'ouvrir un nouveau projet, d'accéder aussi aux bibliothèques des vitrages, des parois, des matériaux, etc. Ainsi d'effectuer le calcul, visualiser les résultats et générer les notes de calcul ;

- Espace 2 : C'est une zone pour la sélection de la ville où se situe le bâtiment ; Seule la sélection de la ville permet de calculer les températures extérieures de bases, les degrés jours de chauffe et de climatisation et les températures extérieures moyennes ;

- Espace 3 : Une zone remplit automatiquement par les températures de confort indiquées au niveau la RTBM ;

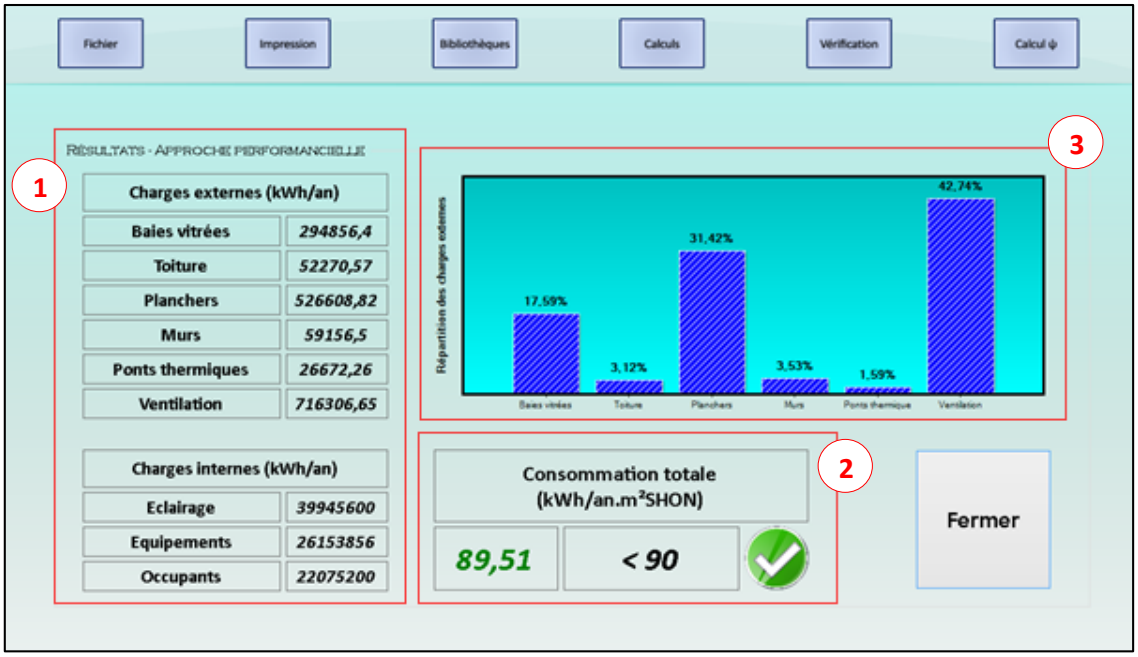
- Espace 4 : Zone pour remplir les caractéristiques du bâtiment à savoir son usage, sa surface hors œuvre nette, et sa hauteur au-dessus du sol…

- Espace 5 : Permet d'introduire les types des parois constituant le bâtiment (Vitrages, Planchers, Façades, …) et des ponts thermiques, par la suite un calcul du coefficient de déperdition est effectué automatiquement ;

- Espace 6 : Permet d'introduite le type d'éclairage et des équipements, ainsi que le type et le nombre des occupants du bâtiment.

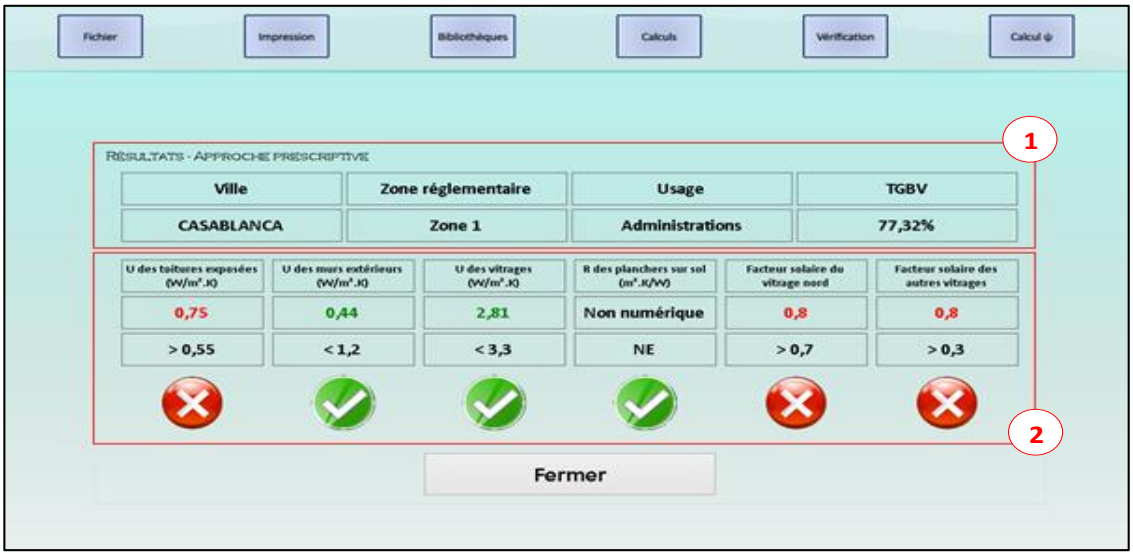
### II.1.3. Données de sortie du logiciel :

1. Approche performancielle :




- Zone 1 : Représente la synthèse de toutes les charges externes et internes du projet, en kWh/an ;
- Zone 2 : Le résultat de calcul de la consommation totale du bâtiment en kWh/an.m²SHON, ainsi que l'exigence maximale tolérée par la norme ;
- Zone 3 : Graphe qui permet de visualiser la part de chaque élément de calcul dans les déperditions au niveau du bâtiment.

2. Approche prescriptive :




- Zone 1 : Affiche les caractéristiques du bâtiment, ainsi que le taux global des baies vitrées (TGBV), nécessaires pour déterminer les exigences prescrites dans la norme ;

- Zone 2 : Permet de comparer les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment avec ceux de la norme.

Notons qu'on pourra générer une note de calcul et imprimer les résultats des trois dernières captures d'écran.

### *II.2. Fiabilité de notre logiciel « ThermoBAT v1.0 » :*

Afin de pouvoir juger la fiabilité du logiciel que nous avons élaboré, nous tenons à le comparer avec « KoZiBox ».

KoZiBox est un logiciel utilisé pour analyser en dynamique les performances thermique d'un bâtiment lorsque celui-ci est soumis à des conditions climatiques variées. Cet outil est destiné à mener des études de chauffage et de refroidissement, de conditionnement d'air et de ventilation, l'objectif principal de KoZiBox est la prédiction de la consommation d'énergie.

- **Données :**
  - Objet de simulation : Local de 20 m x 50 m x 6 m ;
  - La température moyenne extérieure : 6,5 °C ;
  - La température intérieure : 21 °C ;
  - Durée de la période de calcul : 5800 h ;
  - Caractéristiques des parois :
    - Toit : S = 1000 m², U = 2 W/m².K ;
    - Sol : S = 1000 m², U = 2 W/m².K ;
    - Murs : S = 560 m², U = 2 W/m².K ;
    - Fenêtres : S = 280 m², U = 5 W/m².K
  - Occupation : 60 personnes.

- **Résultats de calcul :**

1. Résultats générés par « ThermoBAT v1.0 » :

PROJET : SIMULATION

**Charges externes annuelles :**
Baies vitrées : 120988 kWh/an
Toiture : 172840 kWh/an
Planchers : 127600 kWh/an
Murs : 88148,4 kWh/an
Ponts thermiques : 0 kWh/an
Ventilation : 88148,4 kWh/an

**Charges internes annuelles :**
Eclairage : 0 kWh/an
Equipements : 0 kWh/an
Occupants : 34800 kWh/an

**Consommation totale :**
597,72 (kWh/an.m²SHON)


www.cours-genie-civil.com

2. Résultats générés par « KoZiBox » :

- Puissance de chauffage : 593514 kWh/an ;
- Ratio de consommation : 593,51 kWh/an.m²SHON

3. Précision du calcul : 0,7 %.

Conclusion: Les résultats de calcul de notre logiciel ThermoBAT v1.0 présentent une très bonne approximation par rapport aux résultats du KoZiBox qui fait un calcul dynamique.

## III. Isolation thermique du bâtiment :

L'isolation thermique de notre bâtiment nécessite un choix particulier de matériaux et de solutions thermiques afin de pouvoir respecter l'exigence de la norme avec un coût raisonnable.

Nous présentons dans ce qui suit la solution retenue pour notre bâtiment :

### *III.1. Caractéristiques des parois vitrées :*

La partie vitrée du bâtiment est composée d'un double vitrage 8-6 mm avec une lame d'air de 10 cm, le châssis est un profilé métallique avec rupteur des ponts thermiques, les vitres sont traitées avec une couche basse émissivité et des stores intérieurs y sont intégrés.

- Coefficient de transmission surfacique U (Calculé par ThermoBAT v1.0) = 2,04 W/m².K ;
- Facteur solaire = 0,29 ;
- Surface vitrée = 2922 m².

### *III.2. Caractéristiques des allèges :*

La composition de l'allège est comme suit, de l'intérieur vers l'extérieur : Un enduit de plâtre d'épaisseur 2 cm ; Béton armé d'épaisseur 20 cm ; un mortier de ciment d'épaisseur 2 cm ; un isolant en laine de roche d'épaisseur 8 cm, et une couche d'Alucobond ou de verre émaillé.

- Coefficient de conductivité thermique du plâtre $\lambda = 0,57$ W/m.K ;
- Coefficient de conductivité thermique du béton armé $\lambda = 2$ W/m.K ;
- Coefficient de conductivité thermique du mortier du ciment $\lambda = 1,3$ W/m.K ;
- Coefficient de conductivité thermique de laine de roche $\lambda = 0,04$ W/m.K ;
- Coefficient de conductivité thermique du verre émaillé $\lambda = 1,15$ W/m.K ;
- Coefficient de transmission surfacique U (calculé par ThermoBAT v1.0) :
  - Allège habillée d'une couche de verre émaillé (6 mm) : U = 0,43 W/m².K de surface S = 1370 m² ;
  - Allège habillée d'une couche d'Alucobond : U = 0,43 W/m².K de surface S = 606 m² ;
  - Mur en brique creuse de 10 cm revêtu de 2cm d'enduit de plâtre intérieur, d'Alucobond et de laine de roche sur la face extérieure U = 0,98 W/m².K de surface S = 2007 m².

### III.3. Caractéristiques de la toiture :

La toiture est composé d'un plafond en plâtre BA13 d'épaisseur 5 cm, du béton armé (25 cm), d'une couche de gravillon de 5 cm, un isolant en liège expansé d'épaisseur 7 cm, et d'une forme de pente (épaisseur moyen 10 cm).

- Conductivité thermique du plafond $\lambda = 0,25$ W/m.K ;
- Coefficient de conductivité thermique mortier de ciment $\lambda = 1,3$ W/m.K ;
- Coefficient de conductivité thermique du liège expansé $\lambda = 0,05$ W/m.K ;
- Coefficient de conductivité thermique du gravillon $\lambda = 2$ W/m.K ;
- Coefficient de transmission surfacique U (calculé par ThermoBAT v1.0) :
  - U = 0,51 W/m².K ;
  - S = 1359 m².

### III.4. Caractéristiques des planchers sur local non climatisé :

Ils sont constitués d'un plafond BA13 (5 cm), du béton armé (25 cm) et un carrelage d'épaisseur 1 cm et de conductivité thermique $\lambda = 0,3$ W/m.K

- Coefficient de transmission surfacique U (calculé par ThermoBAT v1.0) = 1,86 W/m².K ;
- S = 2502,5 m².

### III.5. Vérification des performances du bâtiment :

#### III.5.1. Approche performancielle :

- Déperditions par les baies vitrées : 305900 kWh/an ;
- Déperditions par la toiture : 35543,86 kWh/an ;
- Déperdition par les planchers : 238750,03 kWh/an ;
- Déperdition par les murs : 144468,22 kWh/an ;
- Déperdition par les ponts thermiques : 26672,26 kWh/an ;
- Ratio de consommation : 44,12 kWh/an.m²SHON ;
- Consommation maximale exigée par la norme : 45 kWh/an.m²SHON.

#### III.5.2. Approche prescriptive :

| Eléments | Toiture | Murs extérieurs | vitrages |
|---|---|---|---|
| Coefficient de transmission surfacique U (W/m².K) | 0,51 | 0,98 W/m².K | 2,04 W/m².K |
| U exigé (W/m².K) | 0,55 | 1,2 W/m².K | 3,3 W/m².K |
| Condition | satisfaite | satisfaite | satisfaite |

| Eléments | vitrages Nord | vitrages des autres façades |
|---|---|---|
| Facteur solaire | 0,29 | 0,29 |
| Facteur solaire exigé | 0,7 | 0,3 |
| Condition | satisfaite | satisfaite |

*Tableau 55: Résultats de l'approche prescriptive*


LAHSAINI HANAE www.cours-genie-civil.com BAKHARI MOHAMMED

# IV. Impacts de l'application de la RTBM :

## *IV.1. Surcoûts liés au respect de la réglementation :*

Sur la base des études préalablement établies, nous estimons le déboursé sec pour deux cas de configurations ; La première concerne le bâtiment construit de façon classique et la deuxième concerne le bâtiment respectant la réglementation thermique.

Nous présentons dans les tableaux suivants les quantités ainsi que les prix totaux obtenus :

- **Bâtiment classique sans isolation :**

| Désignation | Unité | Quantité | Prix unitaire (DHs) | Total sec |
|---|---|---|---|---|
| Béton pour fondation et élévation | $m^3$ | 10011 | 1400 | 14014798 |
| Acier | Kg | 1609851 | 10 | 16098510 |
| Enduit intérieur en ciment | $m^2$ | 64933 | 33 | 2142789 |
| Enduit extérieur en ciment | $m^2$ | 3888 | 80 | 311040 |
| Simple vitrage (e=6mm) | $m^2$ | 2922 | 80 | 233760 |
| **Total** | | | **32 800 897 (DHs)** | |

*Tableau 56: Déboursé sec d'un bâtiment classique sans isolation*

- **Bâtiment avec isolation thermique :**

| Désignation | Unité | Quantité | Prix unitaire (DHs) | Total sec |
|---|---|---|---|---|
| Béton pour fondation et élévation | m^3 | 10011 | 1400 | 14014798 |
| Acier | Kg | 1609851 | 10 | 16098510 |
| Mortier en ciment | $m^2$ | 1359 | 70 | 95130 |
| Panneau isolant en liège naturel expansé e=7cm | $m^2$ | 1359 | 100 | 135900 |
| Enduit intérieur en plâtre | $m^2$ | 14885,5 | 160 | 2381680 |
| isoalant en laine de roche e=8cm | $m^2$ | 3983 | 70 | 278810 |
| Alucobands | $m^2$ | 2613 | 1100 | 2874300 |
| Double vitrage 8-10-6 | $m^2$ | 2922 | 200 | 584400 |
| vitrage émaillé e=6mm | $m^2$ | 1370 | 80 | 109600 |
| **Total** | | | **36573128 (DHs)** | |

*Tableau 57: Déboursé sec d'un bâtiment avec isolation thermique*

Nous obtenons donc un surcoût de 3 772 231 DHs, ce qui vaut un pourcentage de **11%**.


www.cours-genie-civil.com

### *IV.2. Gains en énergie :*

Nous déterminons le bilan thermique pour les deux cas de configurations et nous obtenons les résultats suivant :

- Pour un bâtiment classique sans isolation, la consommation en énergie est de 86,63 KWH/an.M²SHON ;
- Pour un bâtiment avec isolation thermique (voir détail de calcul dans la partie qui précède), la consommation en énergie est de 44,12 KWH/an.M²SHON.

Le gain d'énergie est de l'ordre de 42,51 KWH/an.M²SHON ce qui est équivalent à un pourcentage de **50%.**

### *IV.3. Rentabilité de l'application de la RTBM :*

Nous avons un gain de 42,51 KWH/an.M²SHON ce qui est équivalent à un pourcentage de 50% ; En terme de coût d'énergie (1,46 DH/KWh ; *référence : Coût de l'office national de l'électricité et de l'eau potable*), un bâtiment non isolé donne un total de 2 641 361 DHs/an alors qu'un bâtiment isolé donne un total de 1 345 225 DHs/an. Ce qui représente un écart de 1 296 136 DHs/an pour tout le bâtiment et donc 62 DHs/ (an.m²SHON).

Le surcoût résultant peut ainsi être récupéré au bout de 3 ans.

Vu la durée de vie de notre bâtiment qui dépasse largement les 3 ans, l'application de la RTBM pour l'isolation thermique s'avère très retable.

# CHAPITRE 7 : ISOLATION ACOUSTIQUE DU BÂTIMENT

## I. Isolation acoustique du bâtiment :

Le niveau d'isolement de la façade dépend dans une large mesure du confort recherché par le consommateur. Il est lié à la destination des locaux, à la sensibilité personnelle au bruit et à l'état de santé.

L'Organisation Mondiale de la Santé (L'OMS) recommande des niveaux moyens de 30 dB(A) la nuit dans la chambre à coucher et de 35 dB(A) dans les pièces de séjour.

La nouvelle réglementation française (NRA 2000) définit les performances acoustiques minimales à respecter dans une construction contre les bruits aériens. Elle a une valeur d'isolement minimale de façade de 30 dB.

### *I.1. Évaluation de l'environnement sonore de la façade :*

Le niveau d'exposition d'une façade dépend en premier lieu du trafic moyen des véhicules, du type de voie, du pourcentage de poids lourds présents dans le trafic ainsi que de la vitesse des véhicules.

Nous présentons dans ce qui suit un exemple établit pour une circulation de 50 km/h et un débit incorporant quelques poids lourds, permettent d'évaluer approximativement le niveau d'exposition journalier d'une façade.

| **Véhicules/heure pour une vitesse de 50 Km/h** | **Niveau d'exposition au bruit en dB(A)** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Rue en U de largeur** | | | **Rue en tissu ouvert** |
| | **15 m** | **20 m** | **30 m** | **10 m** |
| 25 v /h | 57 | 55 | 54 | 51 |
| 50 v /h | 60 | 59 | 57 | 54 |
| 100 v /h | 63 | 62 | 60 | 63 |
| 200 v /h | 66 | 65 | 63 | 66 |
| 400 v /h | 69 | 68 | 66 | 66 |
| 500 v /h | 71 | 69 | 67 | 70 |

*Tableau 58: niveau d'exposition au bruit*

*Source :L'acoustique en pratique CHANGER LES FENÊTRES SOLUTIONS ET CONSEILS POUR LES PROFESSIONNELS*

La gêne est peu probable quand le niveau d'exposition journalier ne dépasse pas 60 dB(A), elle est inévitable dès que celui-ci atteint 70 dB(A).


www.cours-genie-civil.com

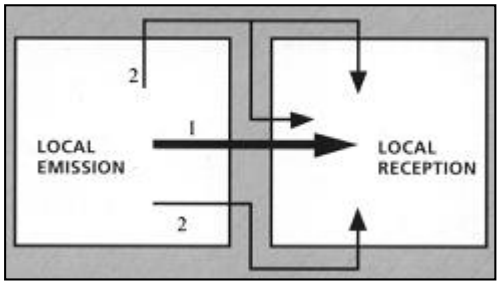
Notre Bâtiment est proche du grand port de Casablanca, elle se situe dans une zone où est prévue une activité importante; Elle sera donc exposée à un niveau de bruit important d'où la nécessité de l'isolation acoustique.

### *I.2. L'indice d'affaiblissement acoustique $R_w$ (C, Ctr) :*

Cet indice caractérise la qualité acoustique d'une paroi de construction (mur, cloison, plancher, plafond, fenêtre, porte, etc.). Il est mesuré uniquement en laboratoire et ne prend en compte que la transmission directe d'un bruit aérien.

Plus $R_w$ est grand, plus l'élément a un isolement acoustique élevé.

Figure 12: 1 transmission directe – 2 transmission latérale




Cependant la valeur de $R_w$ dépend du type de bruit (rose ou routier). De ce fait les performances de la paroi devront prendre en compte deux coefficients d'adaptation :

- C (pour le bruit rose) ;
- Ctr (pour le bruit routier).

Un élément testé sera donc caractérisé par **: Rw, C, Ctr**

- S'il est soumis à un bruit rose son indice d'affaiblissement est **: Rw + C ;**
- S'il est soumis à un bruit routier son indice d'affaiblissement est : **Rw + Ctr.**

Les indices d'affaiblissement retenus lors de notre étude sont présentés comme suit :

| Eléments | Indices d'affaiblissement | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **125 Hz** | **250 Hz** | **500 Hz** | **1 KHz** | **2 KHz** | **4 KHz** | **Rw (C, Ctr) (dB)** | **Rw + Ctr (dB)** |
| Double vitrage clair 8-10-6 | 20 | 21 | 33 | 40 | 36 | 48 | 35 (-2;-6) | 29 |
| Vitrage émaillé 6mm | 18 | 23 | 30 | 35 | 27 | 32 | 31 (-2;-3) | 28 |
| Alucobond 6mm | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 |
| Châssis | 31 | 34 | 34 | 39 | 36 | 41 | 39 (-1;-2) | 37 |
| Etanchéité simple | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| Allège en béton | 53 | 59 | 65 | 71 | 77 | 83 | 70 (-3;-5) | 65 |

*Tableau 59: Valeurs des indices d'affaiblissement des matériaux utilisés*

*source NF EN 12354-3*

Dans le cas d'un élément composé l'indice d'affaiblissement est évalué à partie de la relation suivante :

$$R = -10\ log(\tau_e) \qquad \text{Équation 61}$$

Avec :

$$\tau_e = \sum_{j=1}^{n} \frac{Sj}{S} * 10^{-\frac{Rj}{10}} + \sum_{k=1}^{m} \frac{l_0.lk}{S} * 10^{-\frac{Rk}{10}} \qquad \text{Équation 62}$$

Où :

$Rj$ est l'indice d'affaiblissement acoustique de la partie j de l'élément, en décibels ;

$Sj$ est la surface d'une partie j de l'élément, en mètres carrés ;

$Rk\ est\ l'indice$ d'affaiblissement acoustique d'une fente ou d'un joint scellé k par unité de longueur en décibels;

lk est la longeur de la fente, avec $l_0 = 1m\ servant\ de\ référence$;

### I.3. Calcul de l'isolement acoustique normalisé : $D_{nwT}$

Le calcul de ce coefficient nécessite dans un premier lieu l'évaluation du temps de réverbération Tr.

Le temps de réverbération Tr d'une salle est défini comme étant le temps nécessaire à un bruit pour décroître de 60 dB.
Le temps de réverbération croît avec le volume de la salle. Il diminue quand l'énergie absorbée par les parois augmente.

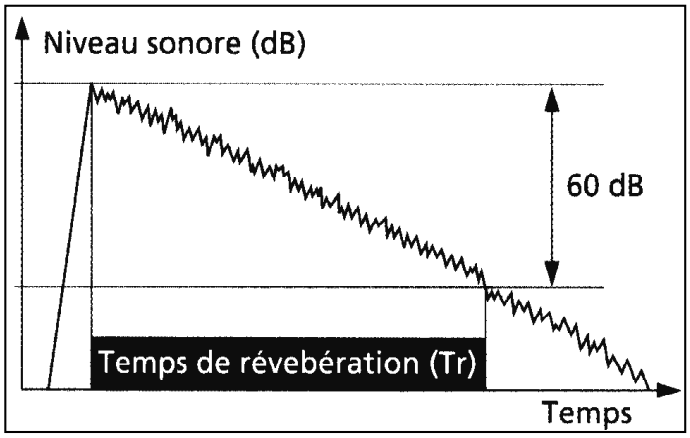



*Figure 13*: Temps de réverbération Tr

Nous calculons le temps de réverbération à l'aide de la formule de Sabine :

$$Tr = \frac{0{,}16V}{A} \qquad \text{Équation 63}$$

Avec : $A = \sum Si * \alpha wi$ est l'aire d'absorption équivalente du local et $\alpha wi$ est le coefficient d'absorbtion.


LAHSAINI HANAE www.cours-genie-civil.com BAKHARI MOHAMMED

Nous présentons dans le tableau suivant les valeurs obtenus pour le calcul de la façade sud du dixième étage :

| | 250 Hz | | 500 Hz | | 1000 Hz | | 2000 Hz | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\alpha$ | $A = S.\alpha$ | $\alpha$ | $A = S.\alpha$ | $\alpha$ | $A = S.\alpha$ | $\alpha$ | $A = S.\alpha$ |
| Plancher technique | 0,11 | 154,5217 | 0,1 | 140,4743 | 0,07 | 98,33198 | 0,08 | 112,3794 |
| Vitrage/châssis | 0,25 | 28,995 | 0,18 | 20,8764 | 0,12 | 13,9176 | 0,07 | 8,1186 |
| Alucobond | 0,05 | 16,648 | 0,05 | 16,648 | 0,05 | 16,648 | 0,05 | 16,648 |
| Allège en béton | 0,01 | 1,13648 | 0,01 | 1,13648 | 0,02 | 2,27296 | 0,05 | 5,6824 |
| Dalle | 0,01 | 14,04743 | 0,01 | 14,04743 | 0,02 | 28,09485 | 0,05 | 70,23713 |
| Bureau | 0,02 | 2,5 | 0,03 | 3,75 | 0,04 | 5 | 0,04 | 5 |
| personnes | 0,33 | 41,25 | 0,4 | 50 | 0,5 | 62,5 | 0,6 | 75 |
| Surface équivalente ($m^2$) | 259,10 | | 246,93 | | 226,77 | | 293,07 | |
| Tr (s) | **3,04** | | **3,19** | | **3,47** | | **2,68** | |

*Tableau 60: Résultats de calcul du temps de réverbération Tr*

On peut alors calculer $D_{nwT}$, Isolement acoustique normalisé sur site :

$$D_{nwT} = R_w + 10\ log\left(\frac{V}{S}\right) + 10\,log\left(\frac{Tr}{0{,}5}\right) \qquad \text{Équation 64}$$

Avec :
$$\begin{cases} R_w : \text{indice d'affaiblissement de la paroi en dB} \\ 0{,}5 : temps\ de\ réference \\ V : le\ volume\ du\ local\ étudié \\ S : surface\ de\ la\ paroi\ de\ séparation \end{cases}$$

Nous pouvons aussi trouver cette expression qui donne les mêmes résultats :

$$D_{nwT} = R_w + 10\,log(0{,}32\ Z) \qquad \text{Équation 65}$$

Avec : Z est la profondeur de la pièce en question.

Nous obtenons donc les résultats suivants :

| Eléments | Ratio de surface Sj/S, Lj/S | Indices d'affaiblissement | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | Rw+Ctr dB |
| Partie de la façade vitrée | | | | | | | | |
| Double vitrage 8-10-6 | ***0,26*** | 25,84 | 26,84 | 38,84 | 45,84 | 41,84 | 53,84 | 34,84 |
| Châssis | ***0,20*** | 38,06 | 41,06 | 41,06 | 46,06 | 43,06 | 48,06 | 44,06 |
| Etanchéité simple | ***0,01*** | 53,61 | 53,61 | 53,61 | 53,61 | 53,61 | 53,61 | 53,61 |
| Réquivalente | | 25,6 | 26,7 | 36,7 | 42,6 | 39,2 | 46,2 | 34,30 |
| Partie de la façade opaque | | | | | | | | |
| Allège en béton | ***0,23*** | 59 | 65 | 71 | 77 | 83 | 89 | 71 |
| Alucobond | ***0,26*** | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Verre émaillé | ***0,45*** | 21 | 26 | 33 | 38 | 30 | 35 | 31 |
| R de la façade | | 25,6 | 26,7 | 36,7 | 42,6 | 39,2 | 46,2 | **34,30** |
| DnT,w de la façade | | **37,38** | **38,47** | **48,51** | **54,38** | **51,03** | **57,97** | **46,09** |

*Tableau 61: Résultats de l'analyse acoustique du bâtiment*

Nous obtenons donc un isolement aux bruits aériens extérieurs normalisé $D_{nT,w}$ de l'ordre de 46dB, ce qui répond bien à la NRA2000 qui exige une valeur de 30dB.

### *I.4. Isolation par rapport aux bruits d'impacts :*

Bruits d'impacts (ou bruits solides) sont les transmissions dans la structure du bâtiment résultants des Pas des personnes, mobilier déplacé, équipements collectifs ou fluides.

Les planchers de notre structure sont revêtus d'un plancher technique qui repose sur une ossature métallique ce qui permet de mettre en place une sous couche évitant ainsi ce type de bruit.

## I.5. Exécution et mise en œuvre :

Nous présentons dans cette partie quelques recommandations qui doivent être respectés pour garantir le bon fonctionnement de l'isolation mise en place.

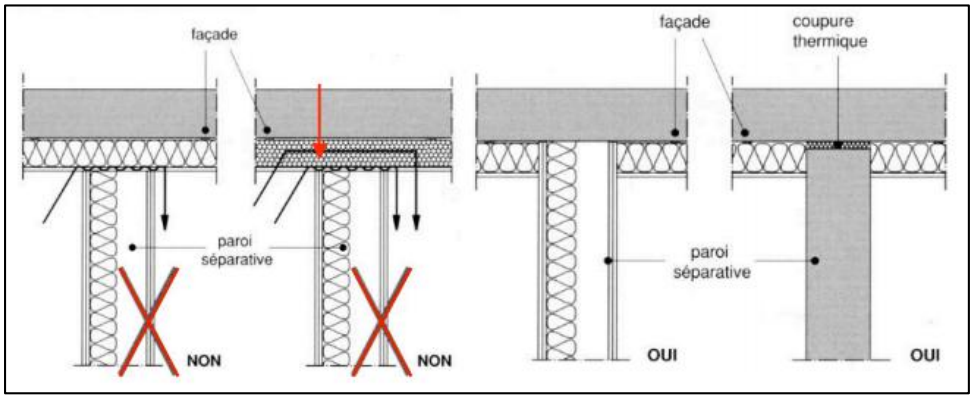



*Figure 14: Jonctions parois séparative / façade*

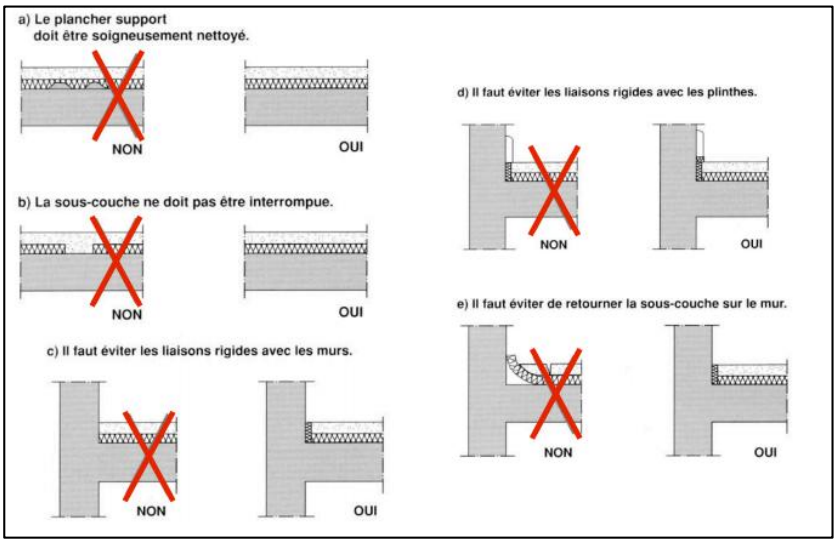



*Figure 15: Dalle flottante*

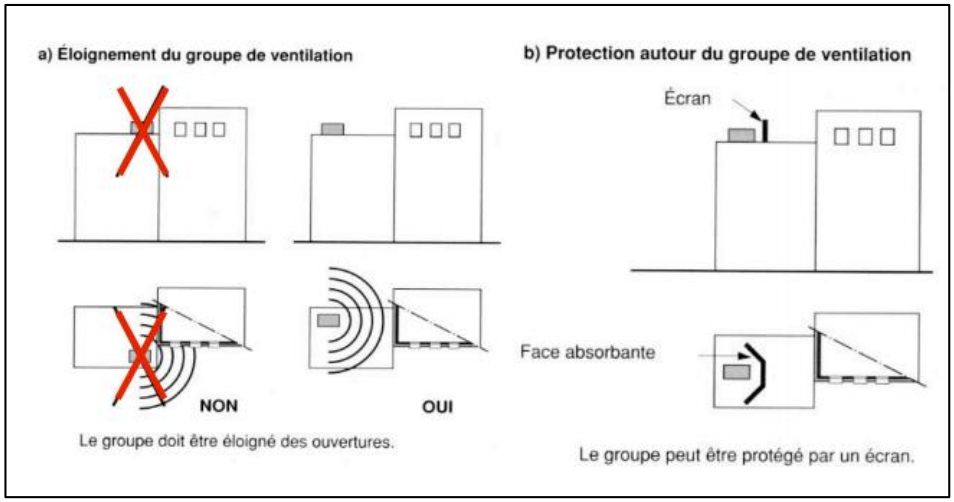



*Figure 16: Protection du groupe de ventilation*

# CONCLUSIONS

Notre projet de fin d'étude s'enchaîne en deux grands axes : Un premier qui porte sur le dimensionnement de la structure en béton armé, un deuxième qui concerne le traitement thermique et acoustique de l'enveloppe de notre bâtiment.

Pour pouvoir entamer le premier axe, il nous a fallu concevoir la structure du bâtiment et opter pour des choix qui remplissent les fonctions préalablement établies au niveau du cahier de charges tout en restant dans une marge économique raisonnable.
Nous avons donc choisi, comme système de contreventement celui du noyau central et comme système de plancher celui des planchers champignons vues les contraintes architecturales et les portées présentées.
L'étape suivante a consisté donc à modéliser la solution retenue et dimensionner ses différents éléments. Il s'agit d'une étape qui nécessite la mise aux normes de la structure (BAEL91, RPS2000, NV65) et donc la maîtrise des règlements et des différents DTU en vigueur.
C'est un calcul sismique qui consiste à choisir judicieusement les dimensions des éléments de structure et de faire les vérifications appropriées qui en découlent et ce afin d'assurer la stabilité de l'ouvrage et sa fonctionnalité.

Le deuxième axe concerne l'étude thermique et acoustique du bâtiment.
Le traitement thermique est un axe qui présente des difficultés particulières vu que nous avons choisi d'appliquer la réglementation thermique des bâtiments au Maroc (RTBM).
C'est une réglementation récente dont les exigences résultent d'un bon compromis entre les réductions en besoins thermiques et les surcoûts d'investissement induits. Notre projet constitue donc, d'une part, un premier pas vers la mise en place de cette réglementation, et d'autre part, un cas réel qui met en relief la rentabilité de son application.


www.cours-genie-civil.com

A cet effet nous avons développé un outil qui permet de calculer le bilan thermique des bâtiments et de vérifier sa conformité par rapport aux exigences de la norme. Nous notons que ce calcul s'adapte bel et bien à la RTBM surtout en termes de zonage et de valeurs limites préconisées.
A travers cette étude de cas nous avons mis le point sur la rentabilité de l'application de la RTBM et il s'est avéré qu'il est bien rentable. En effet, le surcoût résultant est chiffré à **3772231DHs** ce qui représente un surcoût de 11% au niveau des matériaux de construction mais un gain de **42,51KWH/an.M²SHON**. Il s'agit donc d'un surcoût qui peut être récupéré au bout de 3 ans ce qui reflète très clairement la rentabilité de la réglementation thermique.

Pour le traitement acoustique, nous avons évalué la performance de la solution retenue vis-à-vis des bruits aériens tout en appliquant la NRA2000. L'isolement aux bruits aériens extérieurs normalisé obtenu est de l'ordre de 46 dB ce qui dépasse largement les 30 dB exigés par la norme.

Ce projet de fin d'études fut une expérience très enrichissante puisqu'elle nous a permis de mettre en application directe de plusieurs connaissances. C'est un projet lors duquel nous avons été confrontés à beaucoup de difficultés qui ont représenté pour nous une occasion d'apprendre et de s'intégrer dans le milieu professionnel.


www.cours-genie-civil.com

# BIBLIOGRAPHIE :

## Normes :


- *« Code de la construction et de l'habitation »* Version consolidée du code au 14 février 2014.Edition : 2014-02-16.
- *Règles BAEL 91 (DTU P18-702) (mars 1992) : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites + Amendement A1 (*février 2000) REGLEMENT DE CONSTRUCTION PARASISMIQUE (R.P.S 2002) (applicable aux bâtiments).
- *Règles NV65 (adapté au Maroc).*
- *DTU 23.1 (NF P18-210)* (mai 1993) *: Murs en béton banché - Partie 1 : Cahier des clauses techniques.*
- *Règles FB (P92-701)* (décembre 1993) *: Règles de calcul - Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton.*
- *NF P06-004* (mai 1977) *: Bases de calcul des constructions - Charges permanentes et charges d'exploitation dues aux forces de pesanteur.*
- *NF P06-001* (juin 1986) *: Bases de calcul des constructions - Charges d'exploitation des bâtiments.*
- *Règles DTU 13.12 (DTU P11-711)* (mars 1988) *: Règles pour le calcul des fondations superficielles + Erratum* (novembre 1988).
- *Les éléments techniques du projet de la réglementation thermique du bâtiment au Maroc (RTBM).*
- *NF EN 12354-3* (juin 2000) *: Acoustique du bâtiment - Calcul de la performance acoustique des bâtiments à partir de la performance des éléments - Partie 3 : Isolement aux bruits aériens venus de l'extérieur (Indice de classement : S31-004-3).*
- *NF EN ISO 717-1* (août 1997) *: Acoustique - Evaluation de l'isolement acoustique des immeubles et des éléments de construction - Partie 1 : Isolement aux bruits aériens (Indice de classement : S31-032-1).*
- *NRA 2000.*


## Cours :


- *« Calculs des ossatures »* de M. GUISSI.
- *«Calcul dynamique des structures»* Mme. Azmi.
- *«Contreventement»* M. Niazi.
- *« Cours de béton armé »* ;Dr Ir P. Boeraeve
- *« Cours de thermique et de l'acoustique » de M.*BANHAMMOU.

**Divers :**


- *« CONSTRUCTION PARASISMIQUE EN BETON ARME »*, Patricia BALANDIER pour DDE de la Martinique.
- *« Conception et réalisation d'hôpitaux en zone sismique »* Chapitre 5. Ŕ Contreventements. Victor DAVIDOVICI. 29 mai 2007
- *« Quelles solutions pour des bâtiments de bureaux climatisés à moins de 100 kWh/m² ; Guide des solutions pratiques »* Dominique Marchio, Sila Filfli, ARMINES, Emmanuel Fleury, Jean-Marie Alessandrini, Jean Robert Millet, Pierre Damolis, Daniel Gourmez.

# ANNEXES

*ANNEXES.....95*
*Annexe 1 : Plans de coffrage .....96*
*Annexe 2 : Vérification de la régularité de la structure .....104*
*Annexe 3 : Détail du prédimensionnement des poteaux. .....107*
*Annexe 4 : Calcul de vent.....111*
*Annexe 5 : Analyse modale .....112*
*Annexe 6 : Ferraillage des éléments structuraux .....115*
*Annexe 7 : Calcul de la dalle du 7ème étage.....120*
*Annexe 8 : Données thermiques .....134*
*Annexe 9 : Données acoustiques des matériaux .....137*

# ANNEXE 1 : PLANS DE COFFRAGE

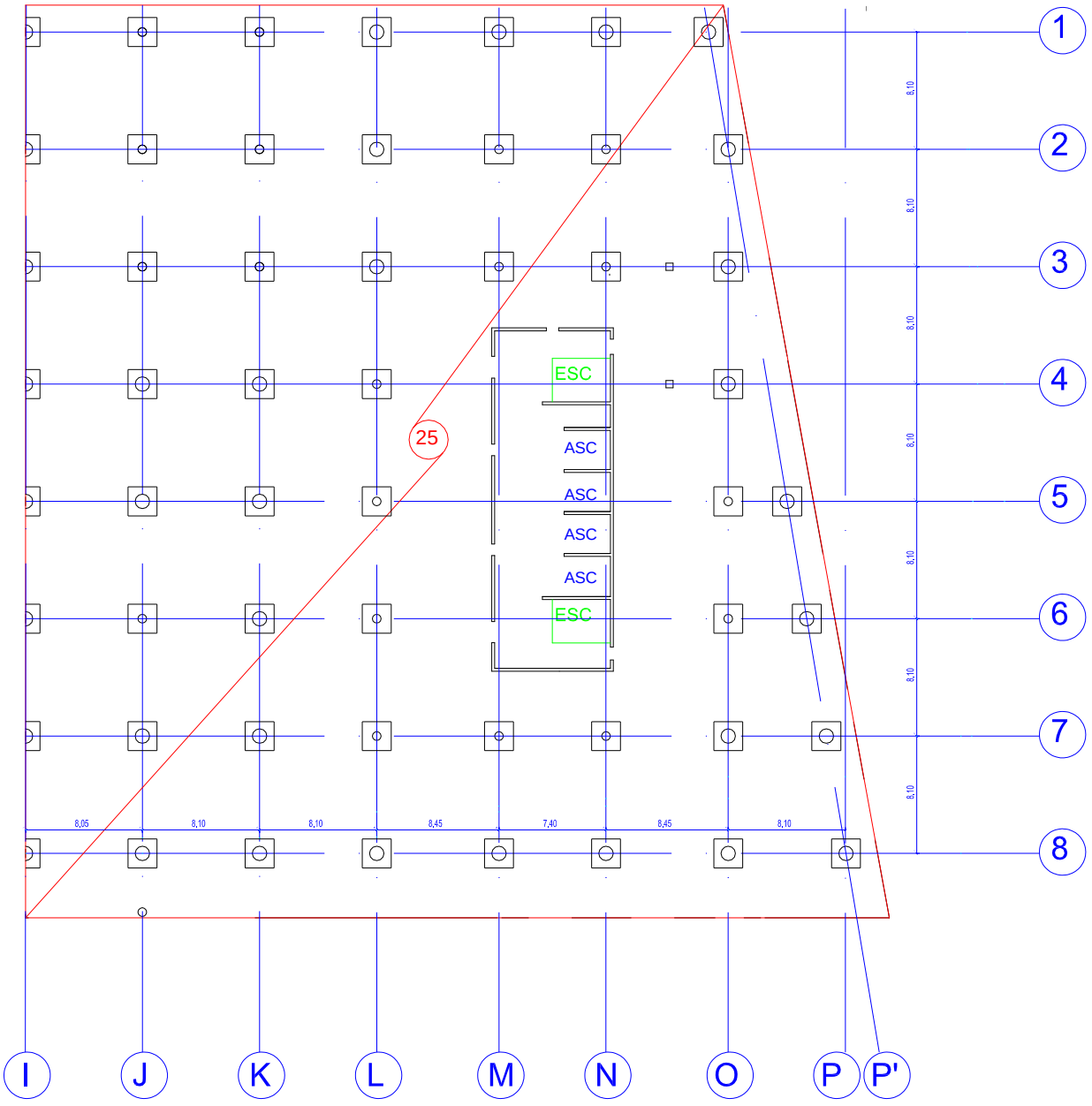



*Figure 17: Plan de coffrage du PH du sous-sol*

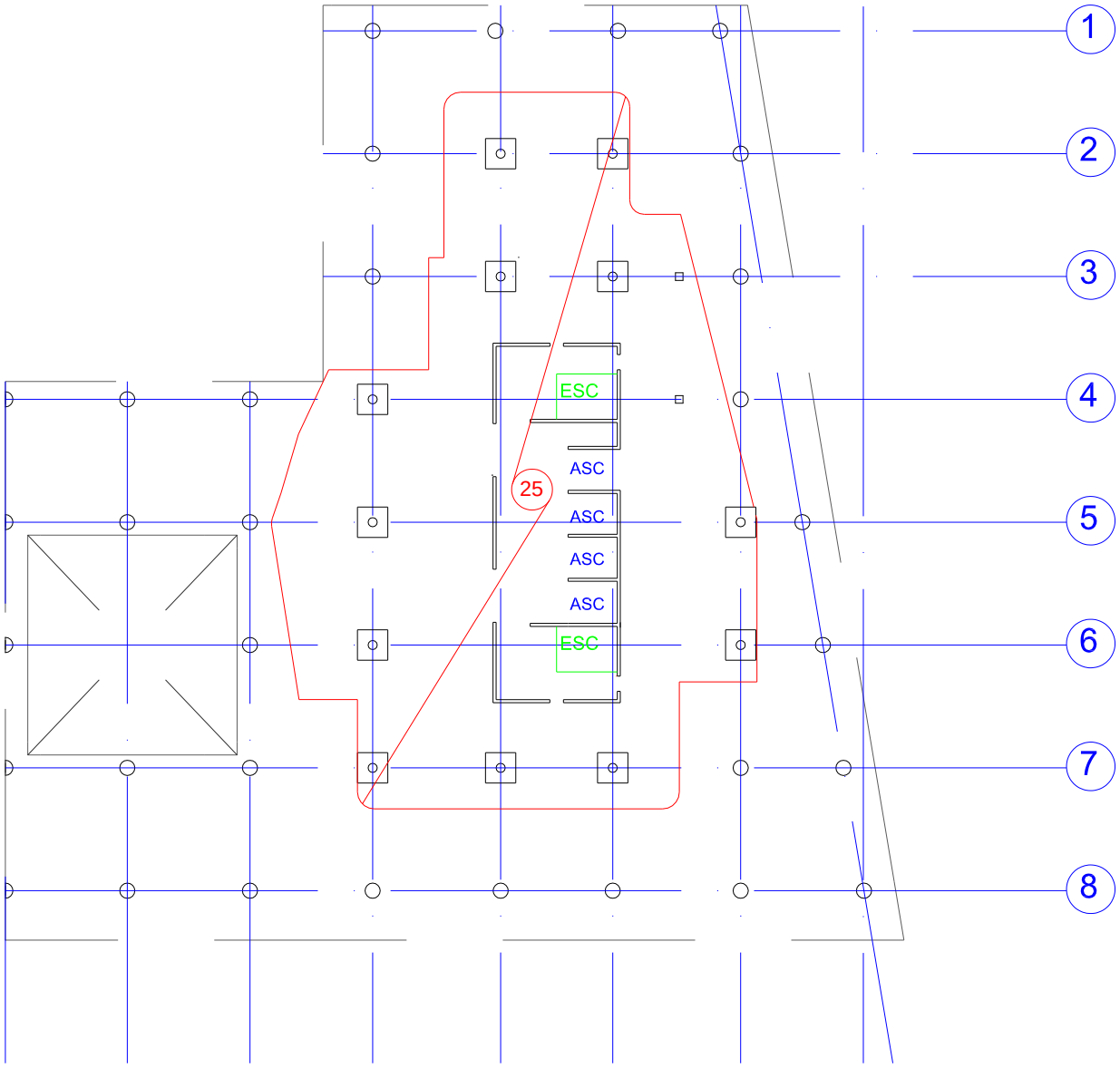



*Figure 18: Plan de coffrage du PH du RDC*

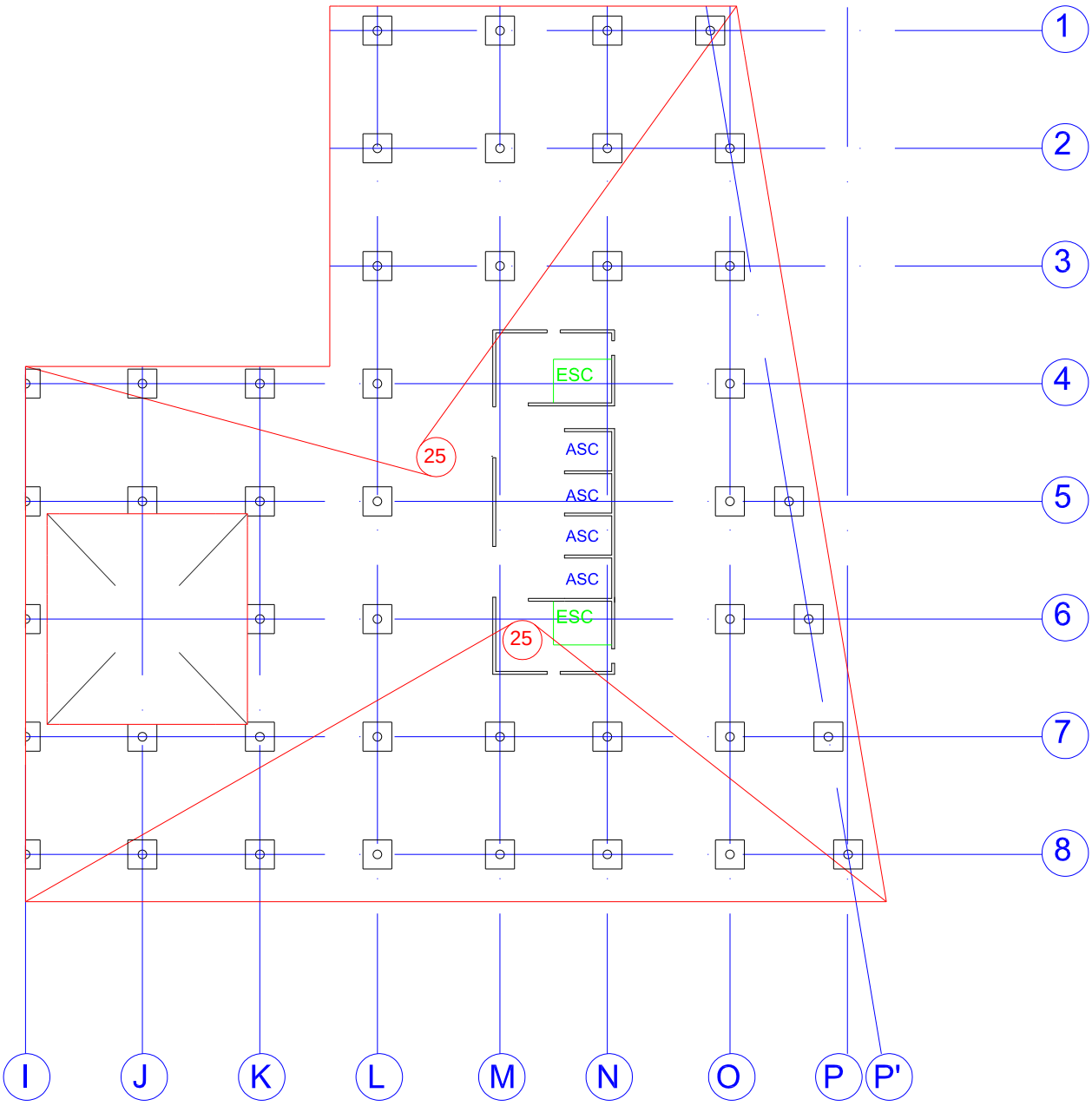



*Figure 19: Plan de coffrage du PH du 1er, 2ème et 3ème étage*

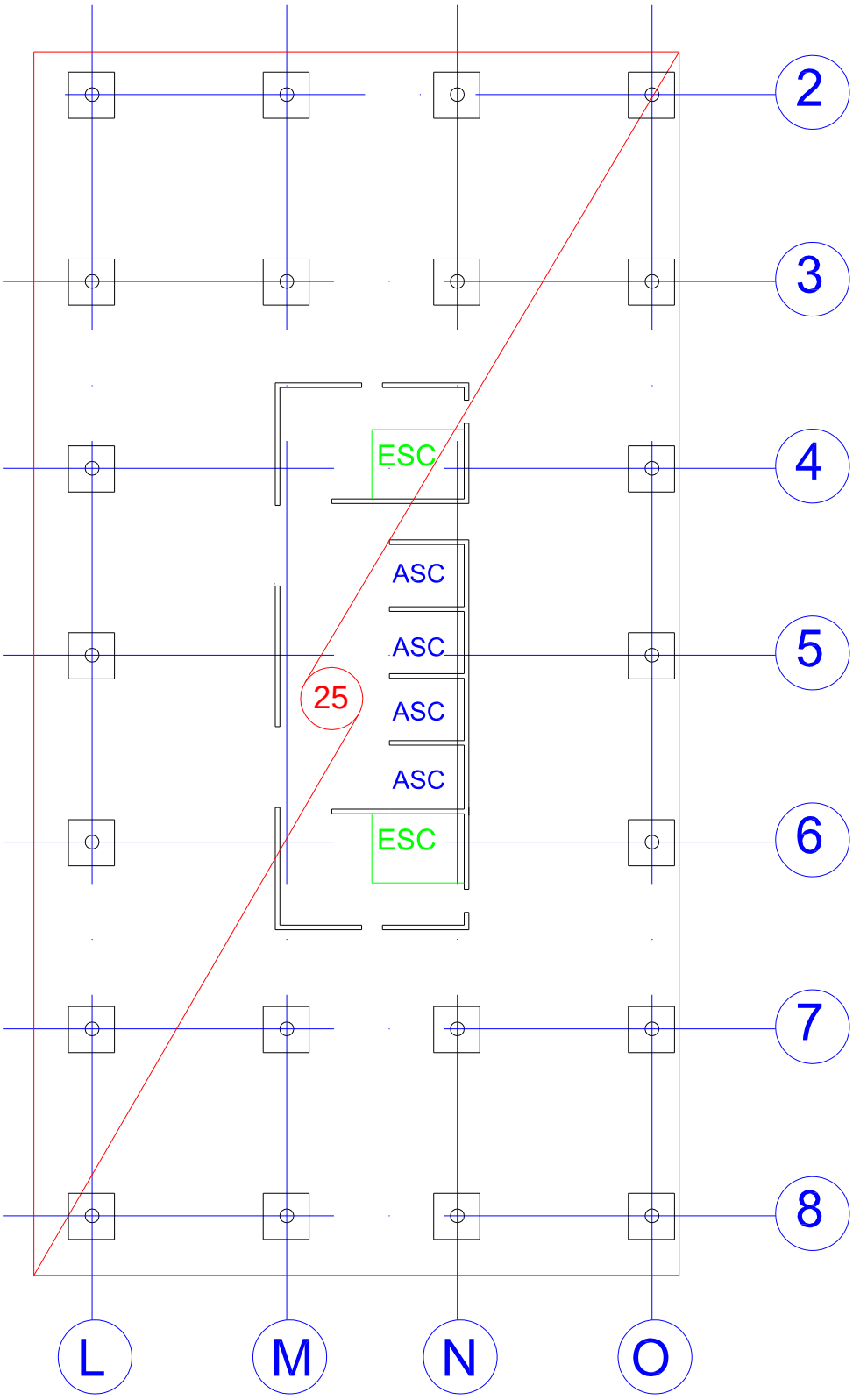



*Figure 20: Plan de coffrage du 5ème étage*

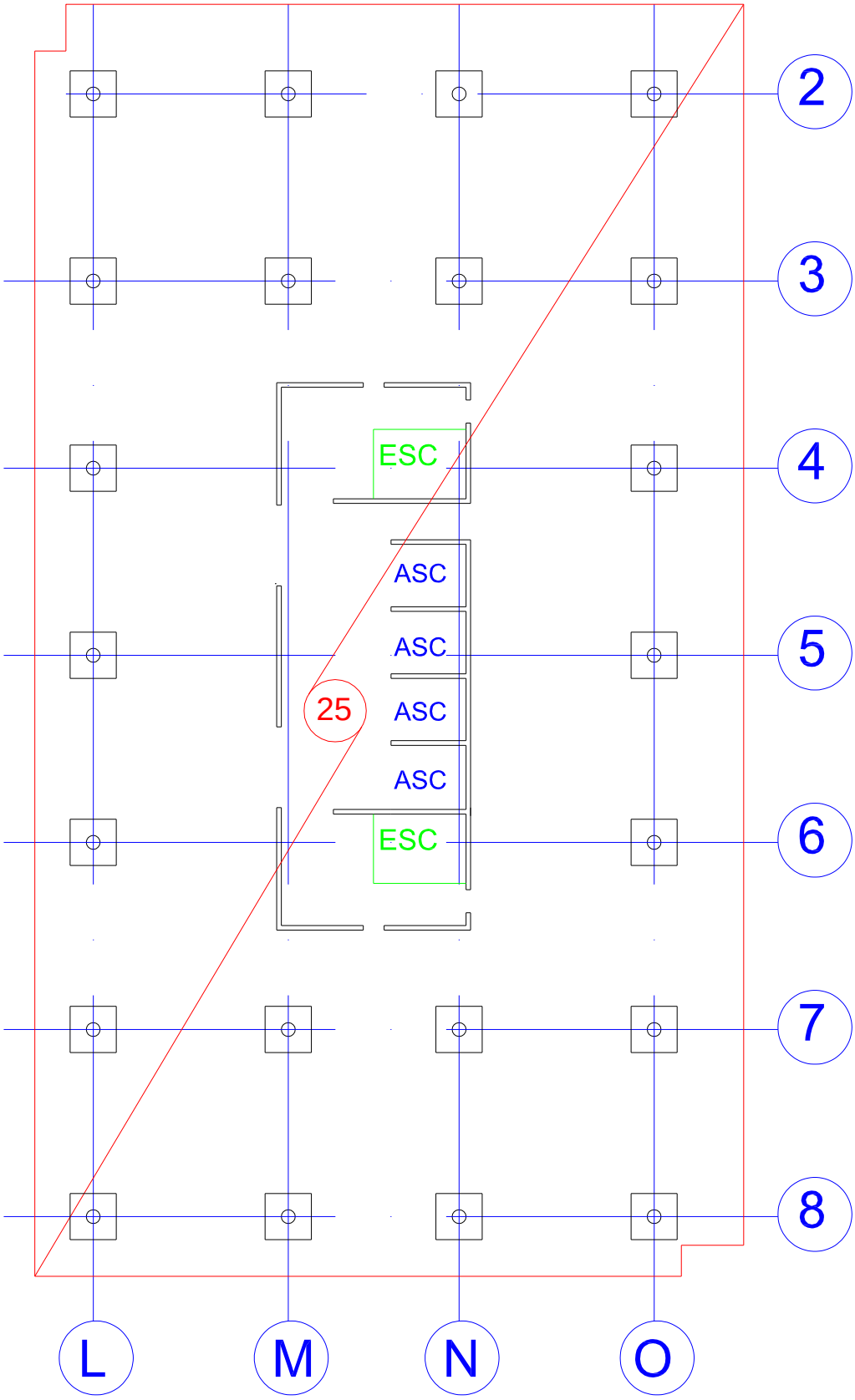



*Figure 21: Plan de coffrage du 6ème étage*

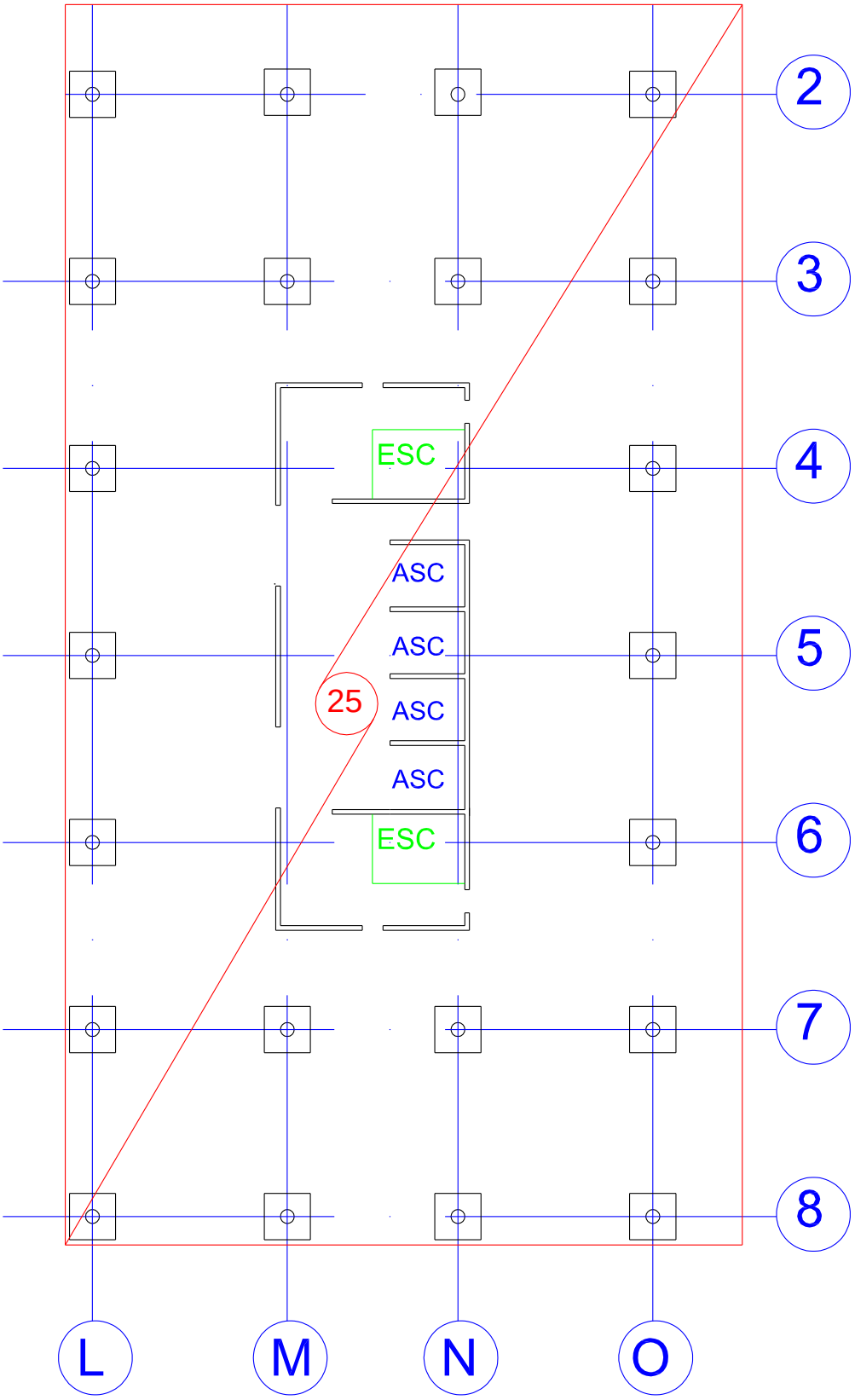



*Figure 22: Plan de coffrage du 7ème étage*

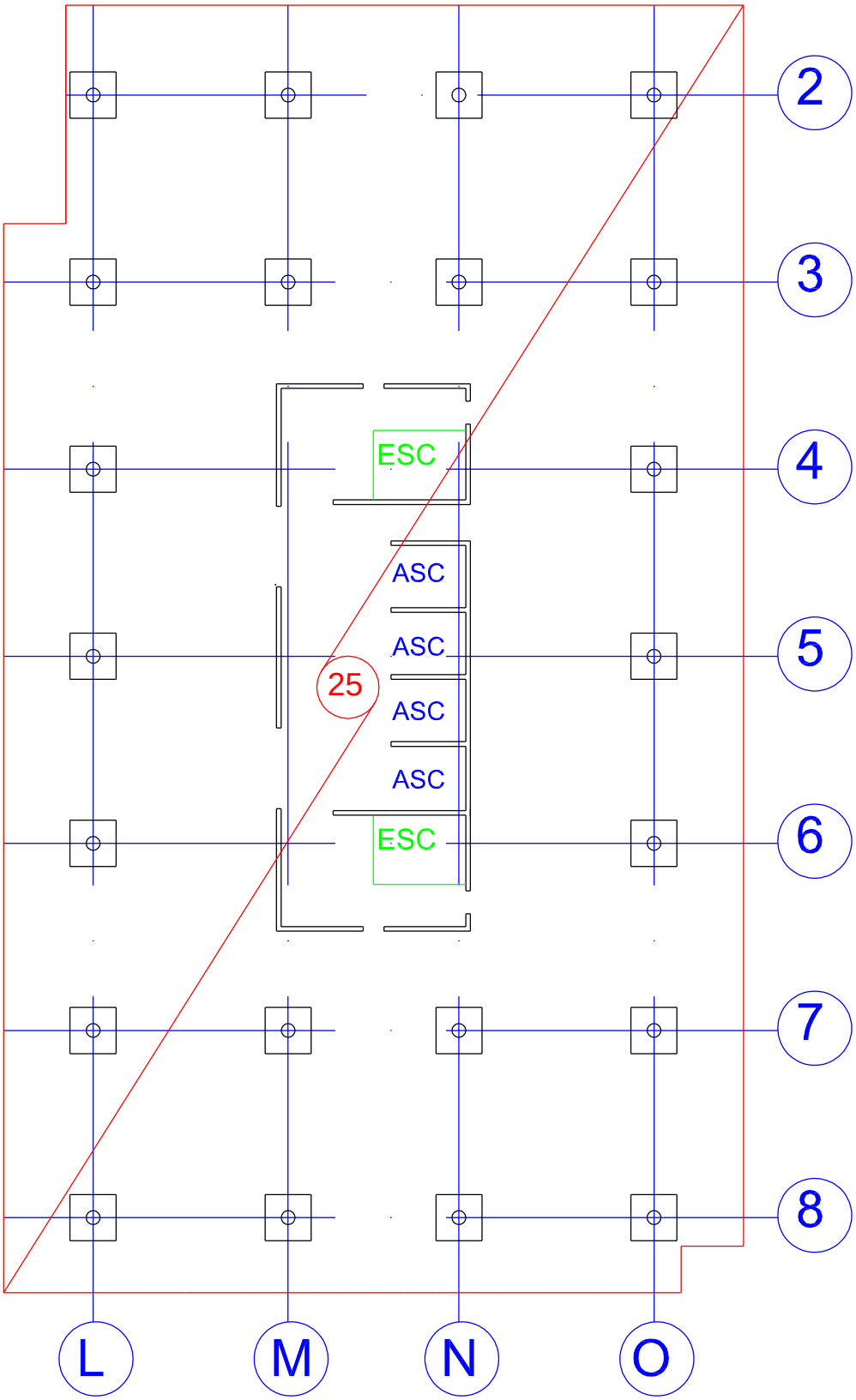



*Figure 23: Plan de coffrage du 8ème étage*

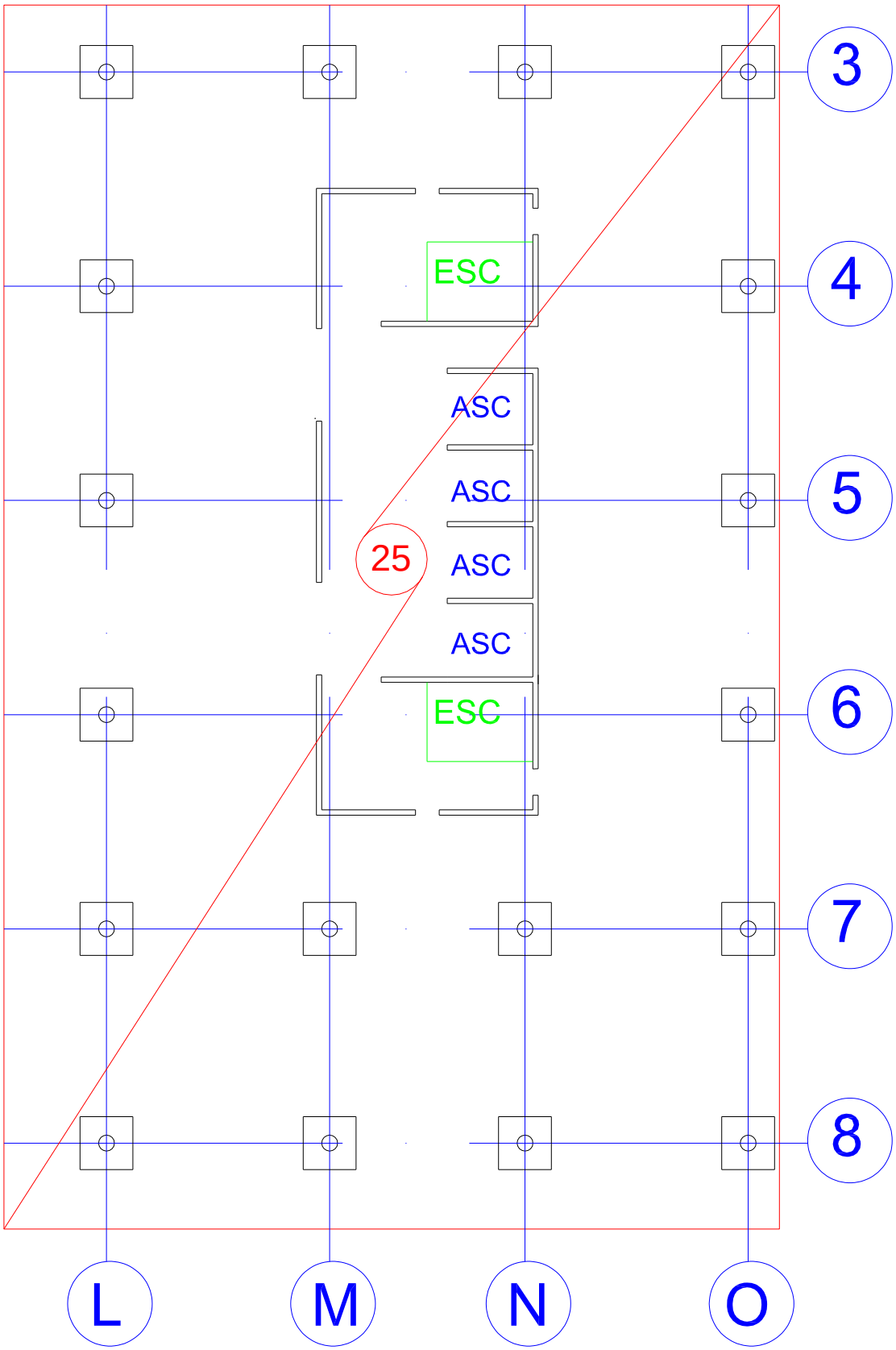
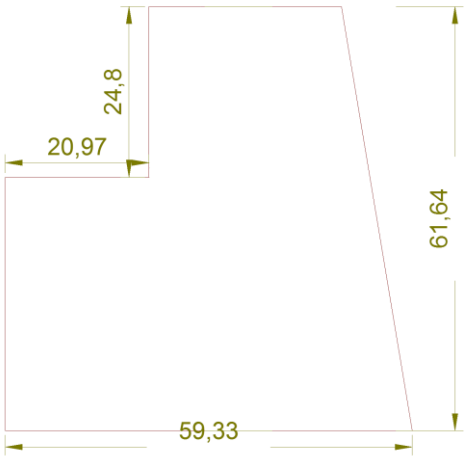



*Figure 24: Plan de coffrage du 9ème au 14ème étage*

# ANNEXE 2 : VÉRIFICATION DE LA RÉGULARITÉ DE LA STRUCTURE

## A) Régularité en plan :

- **Les critères 1 et 2** ne sont pas vérifiés pour le cas de notre structure. La figure ci-après présente la forme en plan du plancher haut Sous-sol.




- Nous évaluons pour les étages de notre structure la racine carrée e du rapport de la raideur de torsion sur la raideur de translation dans les deux directions X et Y :

| Sous-Sol | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Voile*** | ***X (m)*** | ***Y (m)*** | $I_x$ ***(m4)*** | $I_y$ ***(m4)*** | $I_x.X^2$ | $I_y.Y^2$ |
| V01 | 38,7150 | 26,2200 | 0,0024 | 0,8100 | 3,6422 | 556,8656 |
| V02 | 34,1650 | 26,2200 | 0,0024 | 0,8100 | 2,8364 | 556,8656 |
| V03 | 32,3500 | 31,9950 | 1,5690 | 0,0030 | 1641,9938 | 3,0710 |
| V04 | 32,3500 | 38,1200 | 3,7830 | 0,0040 | 3958,9946 | 5,8125 |
| V05 | 32,3500 | 44,2450 | 1,5690 | 0,0030 | 1641,9938 | 5,8729 |
| V06 | 34,1650 | 49,7200 | 0,0024 | 0,8100 | 2,8364 | 2002,3835 |
| V07 | 38,7150 | 49,7200 | 0,0024 | 0,8100 | 3,6422 | 2002,3835 |
| V08 | 40,4500 | 38,0350 | 134,7380 | 0,0134 | 220458,6524 | 19,3853 |
| V09 | 37,6150 | 44,7000 | 0,0039 | 3,3370 | 5,5181 | 6667,6263 |
| V10 | 38,8650 | 42,9200 | 0,0022 | 0,6260 | 3,3684 | 1153,1711 |
| V11 | 38,8650 | 40,0200 | 0,0022 | 0,6260 | 3,3684 | 1002,6019 |
| V12 | 38,8650 | 37,1200 | 0,0022 | 0,6260 | 3,3684 | 862,5619 |
| V13 | 38,8650 | 34,2200 | 0,0022 | 0,6260 | 3,3684 | 733,0513 |
| V14 | 37,6150 | 31,2500 | 0,0039 | 3,3370 | 5,5181 | 3258,7891 |
| V15 | 32,3400 | 27,1600 | 0,1110 | 0,0012 | 116,0922 | 0,9147 |
| V16 | 32,3400 | 48,7850 | 0,1110 | 0,0012 | 116,0922 | 2,9512 |
| $r_x = \sqrt{\frac{\sum Ix.X^2}{\sum Ix}}$ | | **40,0809** | $r_y = \sqrt{\frac{\sum Iy.Y^2}{\sum Iy}}$ | | **38,9042** | |

*Tableau 62: Calcul des rapports des raideurs pour le Sous-Sol*

| Etage courant | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Voile** | **X (m)** | **Y (m)** | **$I_x$ (m4)** | **$I_y$ (m4)** | **$I_x.X^2$** | **$I_y.Y^2$** |
| V01 | 55,3450 | 0,0099 | 40,4500 | 35,4600 | 90555,6274 | 12,4987 |
| V02 | 0,0024 | 0,8100 | 38,7150 | 26,2200 | 3,6422 | 556,8656 |
| V03 | 0,0024 | 0,8100 | 34,1650 | 26,2200 | 2,8364 | 556,8656 |
| V04 | 0,0024 | 0,8100 | 34,1650 | 49,7200 | 2,8364 | 2002,3835 |
| V05 | 0,0024 | 0,8100 | 38,7150 | 49,7200 | 3,6422 | 2002,3835 |
| V06 | 0,0039 | 3,3370 | 37,6150 | 44,7000 | 5,5181 | 6667,6263 |
| V07 | 0,0022 | 0,6260 | 38,8650 | 42,9200 | 3,3684 | 1153,1711 |
| V08 | 0,0022 | 0,6260 | 38,8650 | 40,0200 | 3,3684 | 1002,6019 |
| V09 | 0,0022 | 0,6260 | 38,8650 | 37,1200 | 3,3684 | 862,5619 |
| V10 | 0,0022 | 0,6260 | 38,8650 | 34,2200 | 3,3684 | 733,0513 |
| V11 | 0,0039 | 3,3370 | 37,6150 | 31,2500 | 5,5181 | 3258,7891 |
| V12 | 2,3430 | 0,0035 | 32,3400 | 46,3850 | 2450,4865 | 7,4444 |
| V13 | 3,7830 | 0,0041 | 32,3400 | 37,9700 | 3956,5474 | 5,8534 |
| V14 | 2,3430 | 0,0035 | 32,3400 | 28,8200 | 2450,4865 | 2,8738 |
| V15 | 0,6380 | 0,0025 | 40,4500 | 46,3850 | 1043,8972 | 5,2929 |
| V16 | 55,3450 | 0,0099 | 40,4500 | 35,4600 | 90555,6274 | 12,4987 |
| $r_x = \sqrt{\frac{\sum Ix.X^2}{\sum Ix}}$ | | **39,4788** | $r_y = \sqrt{\frac{\sum Iy.Y^2}{\sum Iy}}$ | | **38,9040** | |

*Tableau 63: Calcul des rapports des raideurs pour les étages courants*

Nous obtenons donc les résultats suivants :

| Niveau | $e_x$ (m) | 0,2 * $r_x$ (m) | $e_y$ (m) | 0,2 * $r_y$ (m) |
|---|---|---|---|---|
| **SS** | **9,99** | **8,02** | 2,47 | 7,78 |
| RDC | 4,05 | 7,90 | 3,23 | 7,78 |
| **1 ET** | **10,78** | **7,90** | 3,18 | 7,78 |
| **2 ET** | **10,09** | **7,90** | 3,1 | 7,78 |
| **3 ET** | **8,71** | **7,90** | 0,4 | 7,78 |
| 4 ET | 2,67 | 7,90 | 0,55 | 7,78 |
| 5 ET | 2,67 | 7,90 | 0,55 | 7,78 |
| 6 ET | 2,67 | 7,90 | 1,43 | 7,78 |
| 7 ET | 2,55 | 7,90 | 1,8 | 7,78 |
| 8 ET | 2,87 | 7,90 | 1,12 | 7,78 |
| 9 ET | 3,4 | 7,90 | 3,00 | 7,78 |
| 10 ET | 3,4 | 7,90 | 3,00 | 7,78 |
| 11 ET | 3,4 | 7,90 | 3,00 | 7,78 |
| 12 ET | 3,4 | 7,90 | 3,00 | 7,78 |
| 13 ET | 3,4 | 7,90 | 3,00 | 7,78 |
| 14 ET | 3,4 | 7,90 | 3,00 | 7,78 |

*Tableau 64: Vérification du deuxième critère de la régularité en plan*

Le **troisième critère** est donc non-vérifié.

✓ Le **quatrième critère** est vérifié, le tableau ci-après présente les calculs nécessaire :

| Niveau | Petit côté | Grand côté | L/B |
|---|---|---|---|
| SS | 59,72 | 63 | 1,05 |
| RDC | 21,67 | 47,25 | 2,18 |
| 1, 2, 3 | 59,33 | 61,64 | 1,04 |
| 4 à 8 | 30,71 | 55,06 | 1,79 |
| 9 à 14 | 29,36 | 46,28 | 1,58 |

*Tableau 65: Vérification du quatrième critère de la régularité en plan*

## B) Régularité en élévation :

- Nous présentons dans le tableau suivant l'écart des masses entre les différents étages ; Ce **premier critère** est donc non vérifié :

| Niveau | Masse (T) | Ecart % |
|---|---|---|
| SS | 450,2 | 5,42% |
| RDC | 425,8 | 11,11% |
| 1 ET | 378,5 | 8,44% |
| 2 ET | 346,55 | 6,24% |
| **3 ET** | **368,17** | **34,93%** |
| 4 ET | 239,57 | 0,00% |
| 5 ET | 239,57 | 13,75% |
| **6 ET** | **272,52** | **20,97%** |
| 7 ET | 215,37 | 13,90% |
| **8 ET** | **245,3** | **25,56%** |
| 9 ET | 182,6 | 4,23% |
| 10 ET | 174,87 | 7,78% |
| 11 ET | 161,27 | 3,64% |
| 12 ET | 155,4 | 3,39% |
| 13 ET | 150,125 | 0,00% |
| 14 ET | 150,125 | --- |

*Tableau 66: Ecart des masses entre les étages*

- Le **deuxième critère** est non vérifié, en effet, le rétrécissement du 8ème au 9ème étage se fait avec 17%.
- Le **troisième critère** est non vérifié vu que l'élargissement du RDC au premier étage se fait avec 23%.

## C) Conclusion :

Notre structure est non régulière, l'application de la méthode statique équivalente est donc non permis. Le recours à l'analyse modale s'avère obligatoire.

# ANNEXE 3 : DÉTAIL DU PRÉDIMENSIONNEMENT DES POTEAUX.

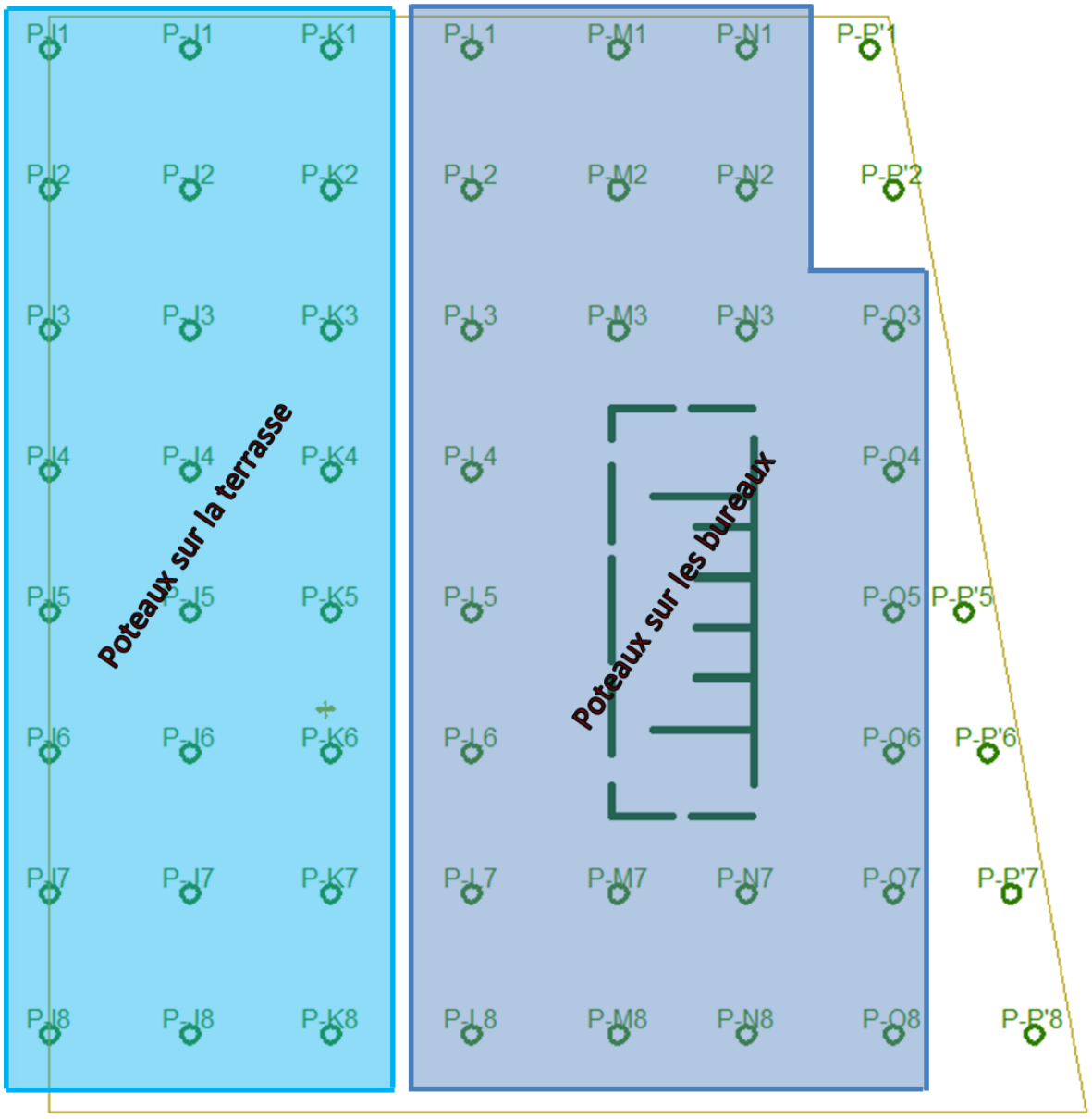



*Figure 25: Indexation des poteaux du sous-sol*

Pour chaque poteau, nous avons obtenu l'effort normal ultime cumulé à partir des résultats du calcul détaillé donnés par CBS.

Le diamètre du poteau est ainsi obtenu par la formule :

$$D \leq 2 \times \sqrt{\frac{Nu}{\pi \,.\, \sigma bc}} \quad , \sigma bc = 17\ MPa$$


www.cours-genie-civil.com

| Poteau sur Terrasse | Sous-Sol | | RDC | | 1 Et | | 2 ET | | 3 Et | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) |
| P-I1 | 466 | 19 | | | | | | | | |
| P-I2 | 640 | 22 | | | | | | | | |
| P-I3 | 640 | 22 | | | | | | | | |
| P-I4 | 1934 | 38 | 1268 | 31 | 1245 | 31 | 807 | 25 | 370 | 17 |
| P-I5 | 2150 | 40 | 1483 | 33 | 1460 | 33 | 998 | 27 | 536 | 20 |
| P-I6 | 1485 | 33 | 819 | 25 | 796 | 24 | 534 | 20 | 272 | 14 |
| P-I7 | 2150 | 40 | 1483 | 33 | 1460 | 33 | 998 | 27 | 536 | 20 |
| P-I8 | 2243 | 41 | 1841 | 37 | 1818 | 37 | 1322 | 31 | 826 | 25 |
| P-J1 | 933 | 26 | | | | | | | | |
| P-J2 | 1281 | 31 | | | | | | | | |
| P-J3 | 1282 | 31 | | | | | | | | |
| P-J4 | 3871 | 54 | 2562 | 44 | 2540 | 44 | 1756 | 36 | 973 | 27 |
| P-J5 | 3458 | 51 | 2150 | 40 | 2127 | 40 | 1479 | 33 | 832 | 25 |
| P-J6 | 1282 | 31 | | | | | | | | |
| P-J7 | 3458 | 51 | 2150 | 40 | 2127 | 40 | 1479 | 33 | 832 | 25 |
| P-J8 | 4618 | 59 | 3704 | 53 | 3681 | 53 | 2562 | 44 | 1443 | 33 |
| P-K1 | 917 | 26 | | | | | | | | |
| P-K2 | 1258 | 31 | | | | | | | | |
| P-K3 | 1258 | 31 | | | | | | | | |
| P-K4 | 4041 | 55 | 2756 | 45 | 2733 | 45 | 1965 | 38 | 1198 | 30 |
| P-K5 | 4614 | 59 | 3329 | 50 | 3307 | 50 | 2430 | 43 | 1557 | 34 |
| P-K6 | 3793 | 53 | 2509 | 43 | 2486 | 43 | 1858 | 37 | 1231 | 30 |
| P-K7 | 4614 | 59 | 3329 | 50 | 3307 | 50 | 2430 | 43 | 1557 | 34 |
| P-K8 | 5242 | 63 | 3924 | 54 | 3901 | 54 | 2804 | 46 | 1709 | 36 |

*Tableau 67: Détail du prédimensionnement des poteaux sur la terrasse.*

| Poteau sur Bureaux | Sous-Sol | | RDC | | 1 Et | | 2 ET | | 3 Et | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) |
| P-L1 | 4251 | 56 | 3142 | 49 | 3021 | 48 | 1946 | 38 | 886 | 26 |
| P-L2 | 9996 | 87 | 8523 | 80 | 8402 | 79 | 7121 | 73 | 5879 | 66 |
| P-L3 | 16630 | 112 | 15165 | 107 | 15044 | 106 | 13810 | 102 | 12609 | 97 |
| P-L4 | 17223 | 114 | 15770 | 109 | 15649 | 108 | 14418 | 104 | 13182 | 99 |
| P-L5 | 17094 | 113 | 15640 | 108 | 15520 | 108 | 14347 | 104 | 13151 | 99 |
| P-L6 | 17135 | 113 | 15671 | 108 | 15550 | 108 | 14374 | 104 | 13176 | 99 |
| P-L7 | 18093 | 116 | 16617 | 112 | 15782 | 109 | 14594 | 105 | 13381 | 100 |
| P-L8 | 17269 | 114 | 15729 | 109 | 15609 | 108 | 14340 | 104 | 13048 | 99 |
| P-M1 | 3933 | 54 | 2867 | 46 | 2746 | 45 | 1802 | 37 | 836 | 25 |
| P-M2 | 11561 | 93 | 10153 | 87 | 8847 | 81 | 7713 | 76 | 6556 | 70 |
| P-M3 | 12957 | 99 | 11869 | 94 | 10802 | 90 | 9921 | 86 | 9020 | 82 |
| P-M7 | 13004 | 99 | 11915 | 94 | 11069 | 91 | 10196 | 87 | 9304 | 83 |
| P-M8 | 16492 | 111 | 15037 | 106 | 14917 | 106 | 13723 | 101 | 12508 | 97 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P-N1 | 3630 | 52 | 2649 | 45 | 2529 | 44 | 1658 | 35 | 764 | 24 |
| P-N2 | 11778 | 94 | 10393 | 88 | 9512 | 84 | 8395 | 79 | 7242 | 74 |
| P-N3 | 12275 | 96 | 11435 | 93 | 10602 | 89 | 9910 | 86 | 9011 | 82 |
| P-N7 | 13009 | 99 | 11920 | 94 | 11063 | 91 | 10191 | 87 | 9299 | 83 |
| P-N8 | 16508 | 111 | 15053 | 106 | 14933 | 106 | 13733 | 101 | 12512 | 97 |
| P-O3 | 12667 | 97 | 11785 | 94 | 11664 | 93 | 11135 | 91 | 10297 | 88 |
| P-O4 | 13647 | 101 | 12532 | 97 | 12412 | 96 | 11714 | 94 | 10721 | 90 |
| P-O5 | 14399 | 104 | 13294 | 100 | 12412 | 96 | 11526 | 93 | 10614 | 89 |
| P-O6 | 14695 | 105 | 13472 | 100 | 12701 | 98 | 11723 | 94 | 10725 | 90 |
| P-O7 | 14648 | 105 | 13317 | 100 | 13197 | 99 | 12120 | 95 | 11022 | 91 |
| P-O8 | 14832 | 105 | 13320 | 100 | 13200 | 99 | 11962 | 95 | 10702 | 90 |

| Poteau sur Bureaux | 4 Et | | 5 Et | | 6 Et | | 7 Et | | 8 Et | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) |
| P-L2 | 4650 | 59 | 3769 | 53 | 2881 | 46 | 1788 | 37 | 857 | 25 |
| P-L3 | 11395 | 92 | 10342 | 88 | 9282 | 83 | 8246 | 79 | 7417 | 75 |
| P-L4 | 12019 | 95 | 10981 | 91 | 9936 | 86 | 8912 | 82 | 8100 | 78 |
| P-L5 | 12010 | 95 | 10972 | 91 | 9927 | 86 | 8908 | 82 | 8097 | 78 |
| P-L6 | 12034 | 95 | 10996 | 91 | 9951 | 86 | 8928 | 82 | 8117 | 78 |
| P-L7 | 12226 | 96 | 11174 | 91 | 10113 | 87 | 9078 | 82 | 8250 | 79 |
| P-L8 | 11876 | 94 | 10896 | 90 | 9907 | 86 | 8940 | 82 | 8305 | 79 |
| P-M2 | 5438 | 64 | 4515 | 58 | 3585 | 52 | 2366 | 42 | 1145 | 29 |
| P-M3 | 8160 | 78 | 7331 | 74 | 6494 | 70 | 5684 | 65 | 4870 | 60 |
| P-M7 | 8451 | 80 | 7630 | 76 | 6802 | 71 | 6001 | 67 | 5197 | 62 |
| P-M8 | 11332 | 92 | 10300 | 88 | 9260 | 83 | 8240 | 79 | 7421 | 75 |
| P-N2 | 6128 | 68 | 5205 | 62 | 4274 | 57 | 2366 | 42 | 1145 | 29 |
| P-N3 | 8152 | 78 | 7324 | 74 | 6489 | 70 | 5680 | 65 | 4868 | 60 |
| P-N7 | 8445 | 80 | 7625 | 76 | 6797 | 71 | 5996 | 67 | 5191 | 62 |
| P-N8 | 11336 | 92 | 10300 | 88 | 9256 | 83 | 8236 | 79 | 7421 | 75 |
| P-O3 | 9498 | 84 | 8657 | 81 | 7808 | 76 | 6571 | 70 | 5326 | 63 |
| P-O4 | 9766 | 86 | 8939 | 82 | 8105 | 78 | 6872 | 72 | 5639 | 65 |
| P-O5 | 9741 | 85 | 8915 | 82 | 8081 | 78 | 6852 | 72 | 5619 | 65 |
| P-O6 | 9765 | 86 | 8938 | 82 | 8105 | 78 | 6871 | 72 | 5639 | 65 |
| P-O7 | 9963 | 86 | 9117 | 83 | 8265 | 79 | 7019 | 73 | 5770 | 66 |
| P-O8 | 9482 | 84 | 8685 | 81 | 7881 | 77 | 6800 | 71 | 5870 | 66 |

| Poteau sur Bureaux | 9 Et | | 10 Et | | 11 Et | | 12 Et | | 13 Et | | 14 Et | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) | Nu (kN) | D (cm) |
| P-L3 | 6246 | 68 | 5151 | 62 | 4070 | 55 | 2996 | 47 | 1936 | 38 | 883 | 26 |
| P-L4 | 6888 | 72 | 5687 | 65 | 4501 | 58 | 3324 | 50 | 2163 | 40 | 1010 | 28 |
| P-L5 | 6885 | 72 | 5685 | 65 | 4499 | 58 | 3323 | 50 | 2162 | 40 | 1010 | 28 |
| P-L6 | 6905 | 72 | 5701 | 65 | 4512 | 58 | 3331 | 50 | 2167 | 40 | 1011 | 28 |
| P-L7 | 7020 | 73 | 5801 | 66 | 4595 | 59 | 3396 | 50 | 2213 | 41 | 1035 | 28 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P-L8 | 7062 | 73 | 5831 | 66 | 4613 | 59 | 3401 | 50 | 2203 | 41 | 1009 | 27 |
| P-M3 | 4078 | 55 | 3352 | 50 | 2639 | 44 | 1936 | 38 | 1249 | 31 | 572 | 21 |
| P-M7 | 4415 | 58 | 3641 | 52 | 2881 | 46 | 2131 | 40 | 1398 | 32 | 673 | 22 |
| P-M8 | 6315 | 69 | 5218 | 63 | 4134 | 56 | 3056 | 48 | 1991 | 39 | 931 | 26 |
| P-N3 | 4079 | 55 | 3352 | 50 | 2639 | 44 | 1936 | 38 | 1250 | 31 | 572 | 21 |
| P-N7 | 4409 | 57 | 3637 | 52 | 2878 | 46 | 2129 | 40 | 1397 | 32 | 673 | 22 |
| P-N8 | 6315 | 69 | 5218 | 63 | 4134 | 56 | 3056 | 48 | 1991 | 39 | 931 | 26 |
| P-O3 | 4114 | 56 | 3383 | 50 | 2666 | 45 | 1956 | 38 | 1261 | 31 | 572 | 21 |
| P-O4 | 4427 | 58 | 3644 | 52 | 2876 | 46 | 2117 | 40 | 1373 | 32 | 639 | 22 |
| P-O5 | 4407 | 57 | 3628 | 52 | 2864 | 46 | 2108 | 40 | 1368 | 32 | 637 | 22 |
| P-O6 | 4427 | 58 | 3644 | 52 | 2876 | 46 | 2116 | 40 | 1373 | 32 | 638 | 22 |
| P-O7 | 4540 | 58 | 3742 | 53 | 2958 | 47 | 2180 | 40 | 1418 | 33 | 662 | 22 |
| P-O8 | 4730 | 60 | 3897 | 54 | 3076 | 48 | 2262 | 41 | 1462 | 33 | 665 | 22 |

*Tableau 68: Détail du prédimensionnement des poteaux sur les bureaux*

A partir de ces résultats, nous avons choisi d'uniformiser le diamètre des poteaux dans chaque étage, en prenant le cas du poteau le plus chargé (P-L7). Ces résultats sont présentés dans le rapport.

# ANNEXE 4 : CALCUL DE VENT

Nous évaluons les valeurs de $K_h$ et de $q_{10}$ normale et extrême pour les différents étages.

| Niveau | H (m) | $K_h$ |
|---|---|---|
| PH RDC | 3,97 | 0,86 |
| PH 1 | 7,47 | 0,94 |
| PH 2 | 10,97 | 1,02 |
| PH 3 | 15,17 | 1,10 |
| PH 4 | 18,67 | 1,17 |
| PH 5 | 22,17 | 1,22 |
| PH 6 | 26,37 | 1,28 |
| PH 7 | 29,87 | 1,33 |
| PH 8 | 34,07 | 1,38 |
| PH 9 | 37,57 | 1,42 |
| PH 10 | 41,07 | 1,46 |
| PH 11 | 44,57 | 1,50 |
| PH 12 | 48,07 | 1,53 |
| PH 13 | 51,57 | 1,56 |
| PH 14 | 55,07 | 1,59 |

*Tableau 69: Valeurs de Kh par étage*

| Niveau | H (m) | Kh | Δ | q10, normale (daN/m²) | q10, extrême (daN/m²) |
|---|---|---|---|---|---|
| PH RDC | 3,97 | 0,86 | 0,75 | 46,510 | 81,396 |
| PH 1 | 7,47 | 0,94 | 0,75 | 51,122 | 89,468 |
| PH 2 | 10,97 | 1,02 | 0,75 | 55,279 | 96,744 |
| PH 3 | 15,17 | 1,10 | 0,75 | 59,757 | 104,581 |
| PH 4 | 18,67 | 1,17 | 0,75 | 63,123 | 110,472 |
| PH 5 | 22,17 | 1,22 | 0,75 | 66,203 | 115,861 |
| PH 6 | 26,37 | 1,28 | 0,75 | 69,569 | 121,752 |
| PH 7 | 29,87 | 1,33 | 0,75 | 72,134 | 126,241 |
| PH 8 | 34,07 | 1,38 | 0,77 | 76,665 | 134,172 |
| PH 9 | 37,57 | 1,42 | 0,78 | 80,290 | 140,514 |
| PH 10 | 41,07 | 1,46 | 0,79 | 83,834 | 146,717 |
| PH 11 | 44,57 | 1,50 | 0,81 | 87,306 | 152,794 |
| PH 12 | 48,07 | 1,53 | 0,82 | 90,713 | 158,757 |
| PH 13 | 51,57 | 1,56 | 0,84 | 94,062 | 164,616 |
| PH 14 | 55,07 | 1,59 | 0,85 | 97,356 | 170,383 |

*Tableau 70: Pression dynamique par étage*


www.cours-genie-civil.com

# ANNEXE 5 : ANALYSE MODALE

Nous présentons dans le tableau suivant les résultats de l'analyse modale obtenu à partir du logiciel Robot :

| Mode | Fréquence [Hz] | Masses Cumulées UX [%] | Masses Cumulées UY [%] | Masse Modale UX [%] | Masse Modale UY [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,88 | 55,33 | 0,55 | 55,33 | 0,55 |
| 2 | 1,06 | 62,89 | 9,20 | 7,56 | 8,66 |
| 3 | 1,36 | 63,00 | 63,44 | 0,11 | 54,24 |
| 4 | 2,50 | 63,61 | 67,06 | 0,61 | 3,61 |
| 5 | 3,28 | 79,57 | 67,24 | 15,96 | 0,18 |
| 6 | 3,54 | 82,94 | 67,24 | 3,38 | 0,00 |
| 7 | 4,19 | 83,10 | 68,38 | 0,15 | 1,14 |
| 8 | 4,36 | 83,16 | 68,64 | 0,06 | 0,26 |
| 9 | 4,64 | 83,18 | 69,84 | 0,02 | 1,19 |
| 10 | 4,67 | 83,19 | 72,87 | 0,00 | 3,04 |
| 11 | 4,78 | 83,19 | 72,89 | 0,00 | 0,01 |
| 12 | 4,92 | 83,19 | 72,89 | 0,00 | 0,00 |
| 13 | 5,44 | 83,21 | 76,43 | 0,02 | 3,54 |
| 14 | 5,47 | 83,23 | 76,43 | 0,02 | 0,00 |
| 15 | 5,52 | 83,24 | 80,37 | 0,01 | 3,94 |
| 16 | 5,77 | 83,40 | 80,39 | 0,15 | 0,01 |
| 17 | 5,82 | 83,64 | 80,79 | 0,24 | 0,40 |
| 18 | 5,85 | 83,65 | 80,81 | 0,01 | 0,02 |
| 19 | 6,15 | 83,65 | 80,83 | 0,00 | 0,02 |
| 20 | 6,19 | 83,65 | 80,84 | 0,00 | 0,01 |
| 21 | 6,21 | 83,72 | 82,07 | 0,07 | 1,23 |
| 22 | 6,30 | 83,72 | 82,18 | 0,00 | 0,12 |
| 23 | 6,34 | 83,78 | 82,19 | 0,06 | 0,00 |
| 24 | 6,41 | 83,78 | 82,19 | 0,00 | 0,00 |
| 25 | 6,47 | 83,78 | 82,27 | 0,00 | 0,08 |
| 26 | 6,50 | 83,79 | 82,52 | 0,00 | 0,25 |
| 27 | 6,52 | 83,79 | 82,56 | 0,00 | 0,05 |
| 28 | 6,55 | 83,79 | 82,88 | 0,00 | 0,32 |
| 29 | 6,58 | 83,79 | 83,04 | 0,00 | 0,16 |
| 30 | 6,68 | 83,79 | 83,08 | 0,00 | 0,04 |
| 31 | 6,77 | 83,79 | 83,08 | 0,00 | 0,00 |
| 32 | 6,81 | 83,80 | 83,08 | 0,00 | 0,00 |
| 33 | 6,93 | 83,80 | 83,08 | 0,00 | 0,00 |
| 34 | 7,04 | 83,80 | 83,08 | 0,00 | 0,00 |
| 35 | 7,08 | 83,80 | 83,09 | 0,00 | 0,00 |
| 36 | 7,22 | 83,81 | 83,10 | 0,01 | 0,01 |
| 37 | 7,24 | 83,83 | 83,10 | 0,02 | 0,00 |


www.cours-genie-civil.com

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 38 | 7,44 | 83,84 | 83,10 | 0,01 | 0,00 |
| 39 | 7,49 | 84,24 | 83,10 | 0,40 | 0,00 |
| 40 | 7,60 | 85,39 | 83,11 | 1,15 | 0,01 |
| 41 | 7,64 | 86,05 | 83,11 | 0,66 | 0,00 |
| 42 | 7,71 | 87,41 | 83,11 | 1,36 | 0,00 |
| 43 | 8,31 | 87,44 | 83,12 | 0,03 | 0,01 |
| 44 | 8,43 | 87,83 | 83,12 | 0,39 | 0,00 |
| 45 | 8,53 | 87,86 | 83,12 | 0,04 | 0,00 |
| 46 | 8,54 | 88,03 | 83,17 | 0,17 | 0,04 |
| 47 | 8,58 | 88,05 | 83,19 | 0,02 | 0,03 |
| 48 | 8,59 | 88,14 | 83,20 | 0,09 | 0,01 |
| 49 | 8,75 | 88,15 | 83,20 | 0,01 | 0,00 |
| 50 | 8,92 | 88,16 | 83,22 | 0,01 | 0,01 |
| 51 | 8,94 | 88,16 | 83,22 | 0,01 | 0,01 |
| 52 | 9,01 | 88,17 | 83,23 | 0,00 | 0,01 |
| 53 | 9,09 | 88,25 | 83,37 | 0,08 | 0,14 |
| 54 | 9,24 | 88,26 | 83,38 | 0,02 | 0,01 |
| 55 | 9,41 | 88,27 | 83,40 | 0,00 | 0,01 |
| 56 | 9,63 | 88,27 | 83,52 | 0,00 | 0,12 |
| 57 | 9,78 | 88,27 | 83,52 | 0,00 | 0,00 |
| 58 | 9,83 | 88,27 | 83,55 | 0,00 | 0,03 |
| 59 | 10,07 | 88,28 | 86,86 | 0,01 | 3,31 |
| 60 | 10,13 | 88,28 | 86,86 | 0,00 | 0,00 |
| 61 | 10,23 | 88,28 | 87,60 | 0,00 | 0,74 |
| 62 | 10,28 | 88,28 | 87,61 | 0,00 | 0,01 |
| 63 | 10,38 | 88,28 | 87,62 | 0,01 | 0,01 |
| 64 | 10,42 | 88,29 | 87,62 | 0,00 | 0,00 |
| 65 | 10,51 | 88,29 | 87,64 | 0,00 | 0,02 |
| 66 | 10,56 | 88,29 | 87,70 | 0,00 | 0,05 |
| 67 | 10,60 | 88,32 | 87,80 | 0,04 | 0,11 |
| 68 | 10,71 | 88,32 | 87,86 | 0,00 | 0,06 |
| 69 | 10,72 | 88,33 | 87,88 | 0,00 | 0,02 |
| 70 | 10,95 | 88,33 | 87,88 | 0,01 | 0,00 |
| 71 | 11,09 | 88,33 | 87,88 | 0,00 | 0,00 |
| 72 | 11,27 | 88,51 | 87,94 | 0,18 | 0,05 |
| 73 | 11,30 | 88,52 | 87,94 | 0,01 | 0,00 |
| 74 | 11,47 | 88,62 | 87,95 | 0,10 | 0,01 |
| 75 | 11,70 | 88,64 | 87,95 | 0,03 | 0,00 |
| 76 | 11,79 | 88,66 | 87,96 | 0,02 | 0,01 |
| 77 | 11,84 | 88,66 | 87,96 | 0,00 | 0,00 |
| 78 | 11,96 | 88,66 | 87,96 | 0,00 | 0,00 |
| 79 | 12,14 | 88,77 | 87,97 | 0,10 | 0,01 |
| 80 | 12,23 | 88,80 | 87,97 | 0,03 | 0,00 |
| 81 | 12,35 | 88,81 | 87,97 | 0,01 | 0,00 |
| 82 | 12,43 | 88,81 | 87,99 | 0,00 | 0,02 |
| 83 | 12,64 | 88,81 | 87,99 | 0,00 | 0,00 |
| 84 | 12,69 | 88,82 | 88,00 | 0,01 | 0,01 |

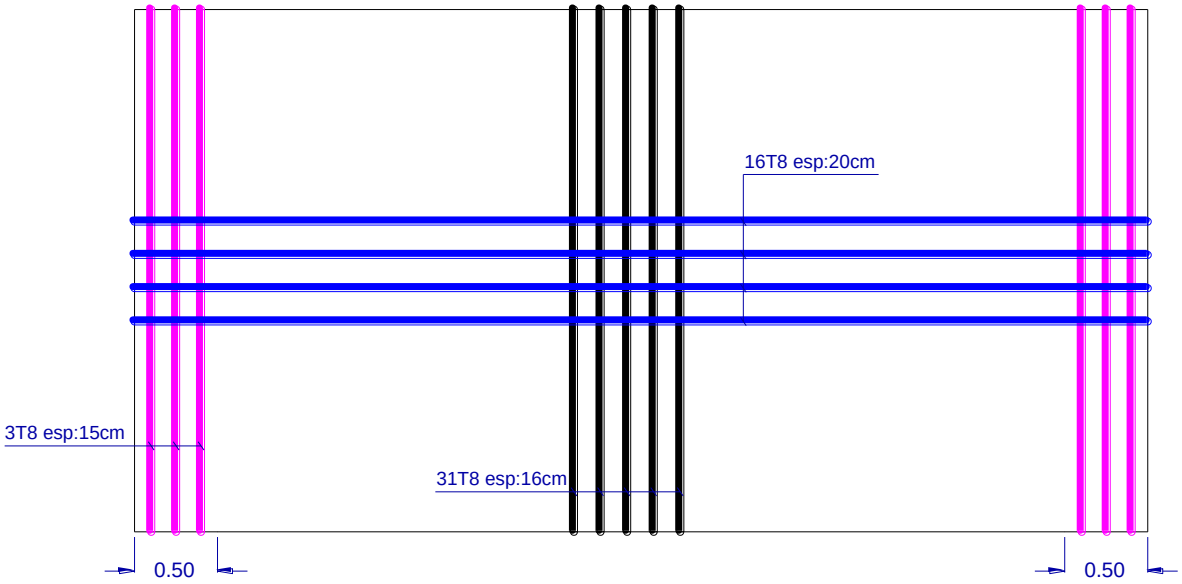
| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 85 | 12,74 | 88,83 | 88,00 | 0,02 | 0,00 |
| 86 | 12,90 | 89,16 | 88,02 | 0,33 | 0,02 |
| 87 | 13,06 | 90,00 | 88,04 | 0,84 | 0,02 |
| 88 | 13,09 | 90,00 | 88,05 | 0,00 | 0,01 |
| 89 | 13,24 | 90,00 | 88,06 | 0,00 | 0,00 |
| 90 | 13,38 | 90,19 | 88,06 | 0,19 | 0,00 |
| 91 | 13,43 | 90,63 | 88,06 | 0,44 | 0,00 |
| 92 | 13,56 | 90,64 | 88,06 | 0,00 | 0,00 |
| 93 | 13,58 | 90,64 | 88,06 | 0,00 | 0,00 |
| 94 | 13,62 | 90,64 | 88,06 | 0,00 | 0,00 |
| 95 | 13,78 | 90,64 | 88,06 | 0,00 | 0,00 |
| 96 | 13,89 | 90,65 | 88,07 | 0,01 | 0,00 |
| 97 | 14,15 | 90,69 | 88,10 | 0,04 | 0,03 |
| 98 | 14,25 | 90,74 | 88,15 | 0,05 | 0,04 |
| 99 | 14,29 | 90,97 | 88,24 | 0,23 | 0,09 |
| 100 | 14,42 | 90,98 | 88,25 | 0,01 | 0,01 |
| 101 | 14,53 | 90,99 | 88,25 | 0,01 | 0,00 |
| 102 | 14,67 | 90,99 | 88,25 | 0,00 | 0,00 |
| 103 | 15,33 | 90,99 | 88,27 | 0,00 | 0,02 |
| 104 | 15,43 | 91,00 | 88,61 | 0,01 | 0,34 |
| 105 | 15,57 | 91,00 | 89,07 | 0,00 | 0,46 |
| 106 | 15,79 | 91,02 | 89,18 | 0,02 | 0,12 |
| 107 | 15,85 | 91,02 | 89,53 | 0,00 | 0,34 |
| 108 | 15,93 | 91,04 | 90,02 | 0,02 | 0,49 |

*Tableau 71: Masses modales dans les directions X et Y*

Nous atteignons 90% de la masse dans les directions X et Y à partir de108 modes.

# ANNEXE 6 : FERRAILLAGE DES ÉLÉMENTS STRUCTURAUX

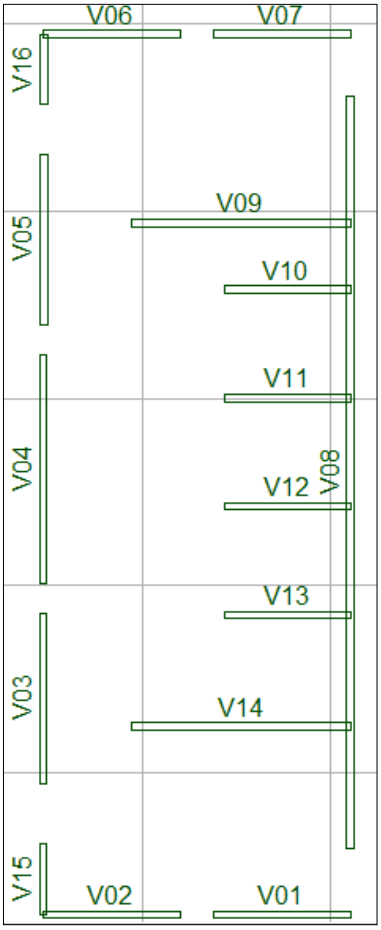
## A) Ferraillage des voiles :




Au niveau du sous-sol les efforts réduits sont :

| Voile | N (T) | T (T) | M (T.m) |
|---|---|---|---|
| V1 | 553,5 | 82,05 | 86,95 |
| V2 | 599,7 | 161,4 | 152,3 |
| V3 | 685,4 | 173,8 | 167,4 |
| V4 | 1368 | 176 | 246 |
| V5 | 664,6 | 175,6 | 187,6 |
| V6 | 564,9 | 177,6 | 143,4 |
| V7 | 509,5 | 111 | 90,7 |
| V8 | 1606,7 | 180,8 | 2992,7 |
| V9 | 981,6 | 85,5 | 390,4 |
| V10 | 564,8 | 80,4 | 184 |
| V11 | 673,5 | 110,9 | 223,6 |
| V12 | 730,1 | 133,8 | 259 |
| V13 | 725,9 | 144,3 | 240 |
| V14 | 1133,4 | 137,2 | 421,9 |

*Tableau 72: Efforts réduits des voiles du sous-sol*



Nous présentons le ferraillage des différents voiles pour le sous-sol ainsi que le 7ème étage :

| Voile | Armature de flexion | Armature verticale | Armature horizontale |
|---|---|---|---|
| V1 | 16HA10 | 20HA8 | 28HA8 |
| V2 | 14HA10 | 32HA8 | 30HA8 |
| V3 | 18HA10 | 28HA8 | 28HA8 |
| V4 | 16HA10 | 62HA8 | 32HA8 |
| V5 | 18HA10 | 28HA8 | 28HA8 |
| V6 | 14HA10 | 32HA8 | 30HA8 |
| V7 | 16HA10 | 20HA8 | 28HA8 |
| V8 | 20HA10 | 152HA8 | 28HA8 |
| V9 | 16HA10 | 54HA8 | 28HA8 |
| V10 | 14HA10 | 28HA8 | 30HA8 |
| V11 | 14HA10 | 28HA8 | 30HA8 |
| V12 | 14HA10 | 28HA8 | 30HA8 |
| V13 | 14HA10 | 28HA8 | 30HA8 |
| V14 | 16HA10 | 54HA8 | 28HA8 |

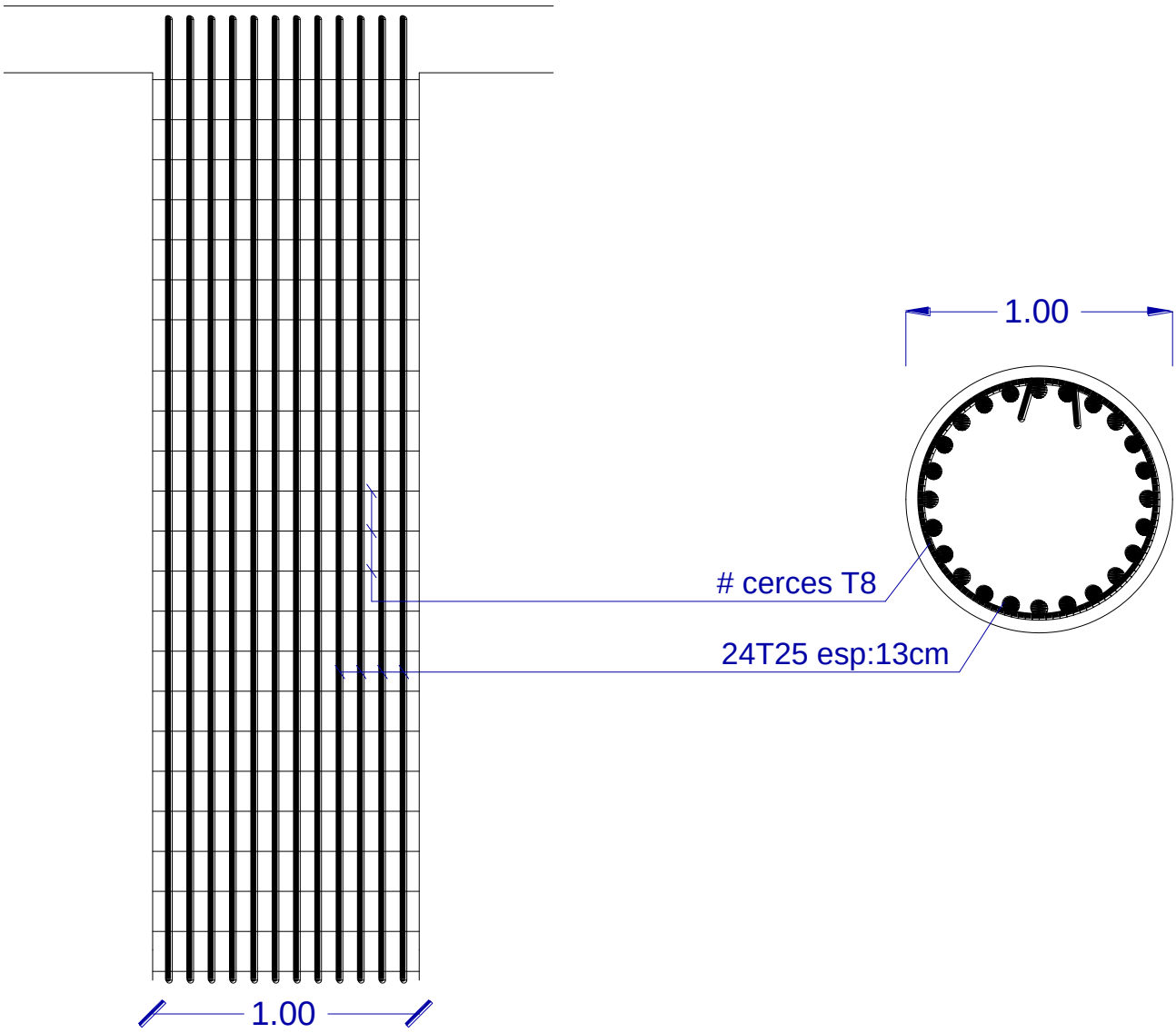
*Tableau 73: Ferraillage des voiles du sous-sol*

Ferraillage des voiles du 7ème étage :

| Voile | Armature de flexion | Armature verticale | Armature horizontale |
|---|---|---|---|
| V1 | 16HA10 | 22HA8 | 28HA8 |
| V2 | 16HA10 | 22HA8 | 28HA8 |
| V3 | 16HA10 | 34HA8 | 28HA8 |
| V4 | 16HA10 | 42HA8 | 28HA8 |
| V5 | 16HA10 | 34HA8 | 28HA8 |
| V6 | 16HA10 | 22HA8 | 28HA8 |
| V7 | 16HA10 | 22HA8 | 28HA8 |
| V8 | 16HA10 | 112HA8 | 28HA8 |
| V9 | 16HA10 | 40HA8 | 28HA8 |
| V10 | 16HA10 | 20HA8 | 28HA8 |
| V11 | 16HA10 | 20HA8 | 28HA8 |
| V12 | 16HA10 | 20HA8 | 28HA8 |
| V13 | 16HA10 | 20HA8 | 28HA8 |
| V14 | 16HA10 | 40HA8 | 28HA8 |

*Tableau 74: Ferraillage des voiles du 7ème étage*

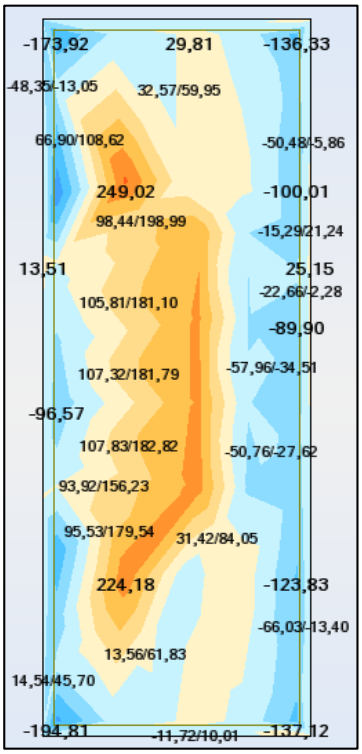
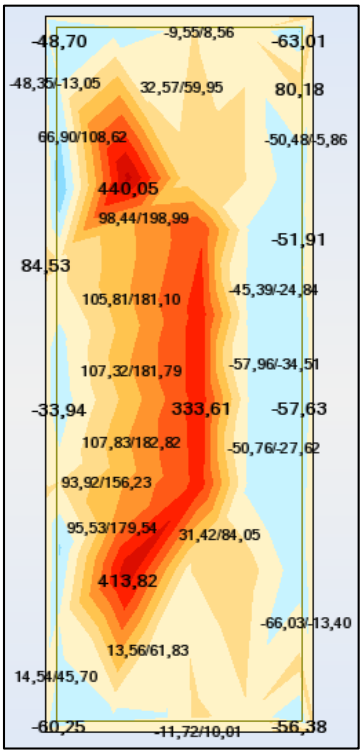
## B) Ferraillage des poteaux :



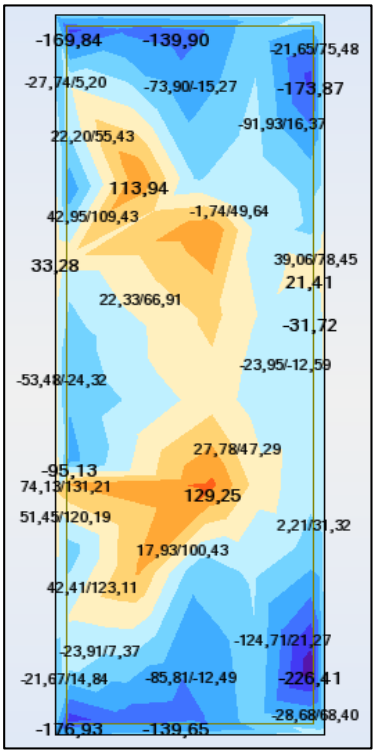
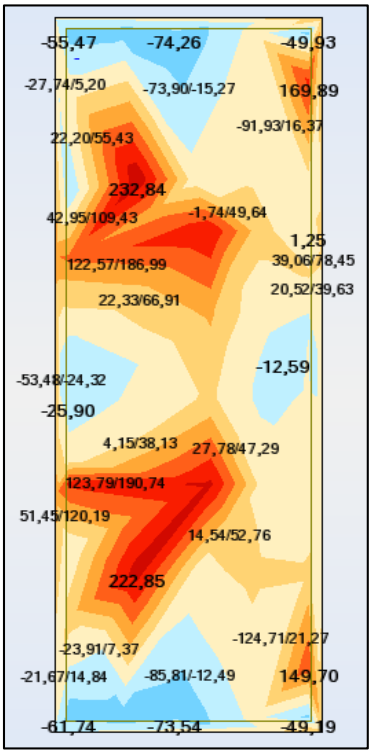
## C) Ferraillage du radier :

Cartographie du radier

**SENS X**

| ACC- | ACC+ |
|---|---|
|  |  |

**SENS Y**

| ACC- | ACC+ |
|---|---|
|  |  |



LAHSAINI HANAE www.cours-genie-civil.com BAKHARI MOHAMMED

Schéma du ferraillage du radier

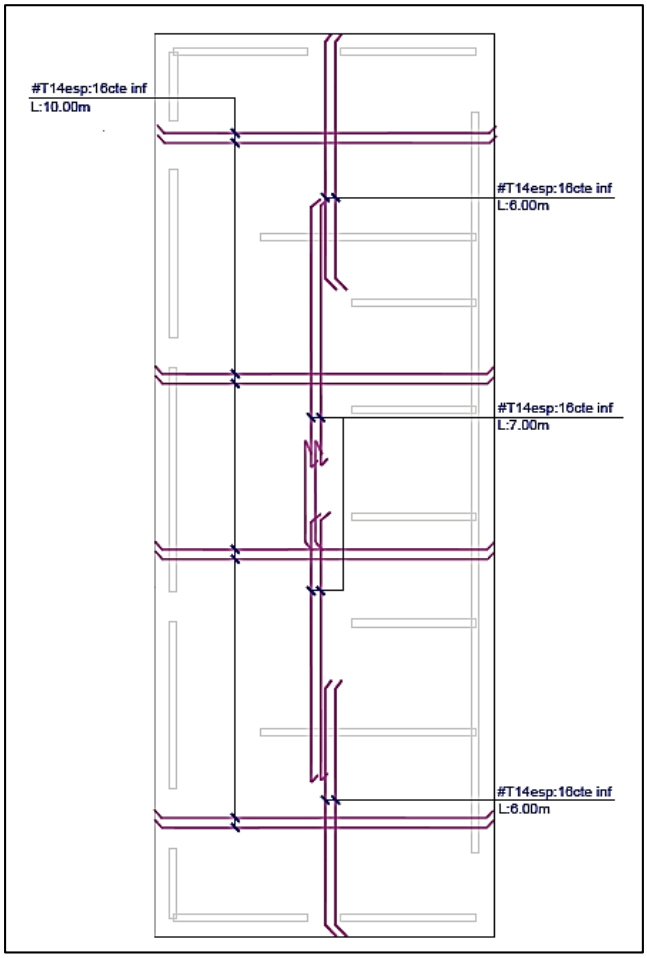



*Figure 26: Ferraillage inférieur du radier*

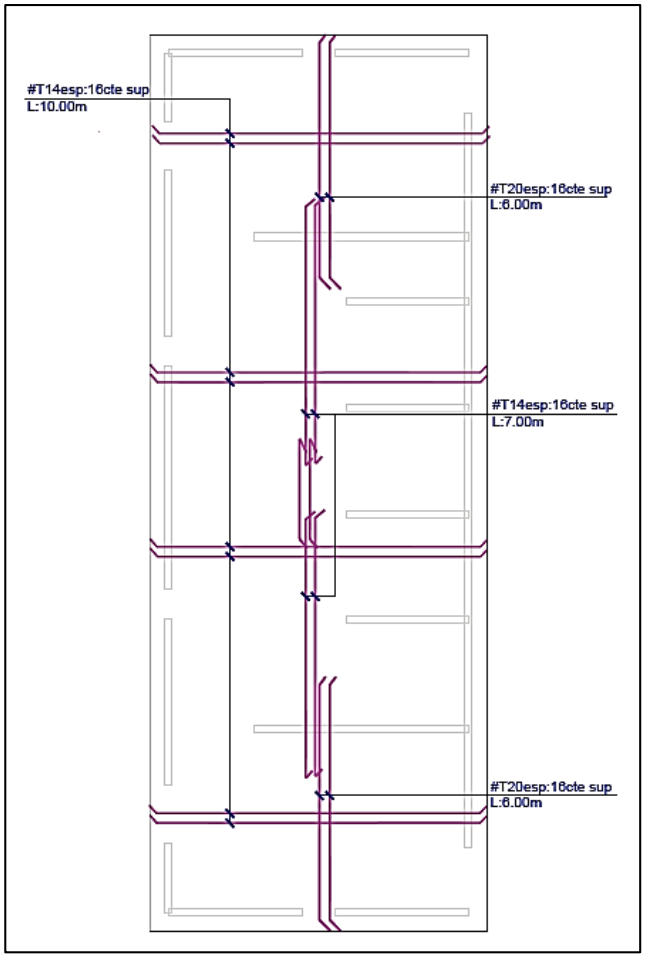



*Figure 27: Ferraillage supérieur du radier*

# ANNEXE 7 : CALCUL DE LA DALLE DU 7ÈME ÉTAGE

## A) Calcul manuel :

Nous procédons à un calcul du panneau P1 du septième étage, le rayon des poteaux R étant de 0,4m. Nous avons donc des dimensions équivalentes a=b= 0,71m.

La charge de calcul est estimée à : g = 0,763 T/m² et q = 0,35 T/m².

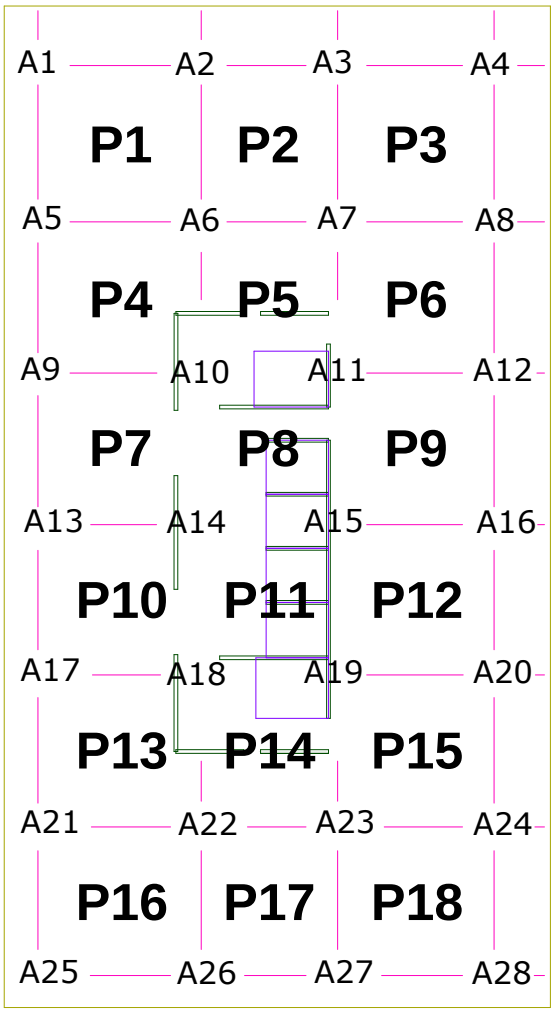



*Figure 30: Panneaux de calcul/ 7ème étage*

Dans les deux sens X et Y, le panneau est divisé en deux bandes, chacune contient deux appuis A et B.

| | Bande 1 | | Bande 2 | |
|---|---|---|---|---|
| | **Appui A** | **Appui B** | **Appui A** | **Appui B** |
| $l_{tw}$ | 1,18 | 8,45 | 1,18 | 8,45 |
| $l_{te}$ | 8,45 | 7,4 | 8,45 | 7,4 |
| $l_{y0}$ | 3,88 | 3,88 | 0 | 0 |
| $l_{y1}$ | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 |
| $l_{y2}$ | 0 | 0 | 8,1 | 8,1 |

*Tableau 75: Données de calcul dans le sens X*

| | Bande 1 | | Bande 2 | |
|---|---|---|---|---|
| | **Appui A** | **Appui B** | **Appui A** | **Appui B** |
| $l_{tw}$ (m) | 3,88 | 8,1 | 3,88 | 8,1 |
| $l_{te}$ (m) | 8,1 | 8,1 | 8,1 | 8,1 |
| $l_{y0}$ (m) | 1,18 | 1,18 | 0 | 0 |
| $l_{y1}$ (m) | 8,45 | 8,45 | 8,45 | 8,45 |
| $l_{y2}$ (m) | 0 | 0 | 7,4 | 7,4 |

*Tableau 76: Données de calcul dans le sens Y*

Dans un premier temps, nous faisons un **calcul sans chapiteaux** ($h_2$=0).

| | | Bande 1 | | Bande 2 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Appui A** | **Appui B** | **Appui A** | **Appui B** |
| Inerties ($m^4$) | I | 0,010326 | | 0,007038 | |
| | $I_s$ | 0,021055 | | 0,021055 | |
| | $I_n$ | 0,021055 | | 0,021055 | |
| $\lambda_h$ | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $\lambda_{lw}$ | | 0,399 | 0,916 | 0,399 | 0,916 |
| $\lambda_{le}$ | | 0,916 | 0,904 | 0,916 | 0,904 |
| Position des points de moment nul (m) | $l_{w'}$ | 1,18 | 6,76 | 1,18 | 6,76 |
| | $l_{e'}$ | 6,76 | 5,92 | 6,76 | 5,92 |
| | $h_{s'}$ | 2,56 | 2,56 | 2,56 | 2,56 |
| | $h_{n'}$ | 2,56 | 2,56 | 2,56 | 2,56 |
| Facteurs de rigidité | $K_s$ | 0,00822 | 0,00822 | 0,00822 | 0,00822 |
| | $K_n$ | 0,00822 | 0,00822 | 0,00822 | 0,00822 |
| | $K_w$ | 0 | 0,00153 | 0 | 0,00156 |
| | $K_e$ | 0,00153 | 0,00174 | 0,00156 | 0,00178 |
| | D | 0,01798 | 0,01972 | 0,01801 | 0,01979 |

*Tableau 77: Calcul des données d'entrée dans le sens X*

| | | Bande 1 | | Bande 2 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Appui A | Appui B | Appui A | Appui B |
| Inerties ($m^4$) | I | 0,007038 | | 0,010319 | |
| | $I_s$ | 0,021055 | | 0,021055 | |
| | $I_n$ | 0,021055 | | 0,021055 | |
| $\lambda_h$ | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $\lambda_{lw}$ | | 0,399 | 0,817 | 0,912 | 0,817 |
| $\lambda_{le}$ | | 0,916 | 0,912 | 0,912 | 0,912 |
| Position des points de moment nul (m) | $l_{w'}$ | 3,88 | 6,48 | 3,88 | 6,48 |
| | $l_{e'}$ | 6,48 | 6,48 | 6,48 | 6,48 |
| | $h_{s'}$ | 2,56 | 2,56 | 2,56 | 2,56 |
| | $h_{n'}$ | 2,56 | 2,56 | 2,56 | 2,56 |
| Facteurs de rigidité | $K_s$ | 0,008225 | 0,008225 | 0,008225 | 0,008225 |
| | $K_n$ | 0,008225 | 0,008225 | 0,008225 | 0,008225 |
| | $K_w$ | 0 | 0,001086 | 0 | 0,001086 |
| | $K_e$ | 0,001086 | 0,001086 | 0,001086 | 0,001086 |
| | D | 0,017535 | 0,018621 | 0,017535 | 0,018621 |

*Tableau 78: Calcul des données d'entrée dans le sens Y*

Nous obtenons donc et par rapport aux différents cas de charge les moments suivants :

Premier appui :

| Cas de charge | G | | | | Qw | | | | qe | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Sens X | | Sens Y | | Sens X | | Sens Y | | Sens X | | Sens Y | |
| | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 |
| $M_{w'}$ | -4,21 | -4,30 | -31,04 | -32,37 | -1,974 | -2,96 | -22,26 | -22,76 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $M_{e'}$ | -39,31 | -35,89 | -22,07 | -32,37 | 0 | 0 | 0 | 0 | -18,42 | -24,70 | -15,83 | -22,76 |
| $M_w$ | -4,212 | -4,303 | -31,04 | -32,37 | -1,97 | -2,96 | -22,26 | -20,91 | 0 | 0 | 0 | -1,84 |
| $M_e$ | -34,47 | -33,16 | -22,63 | -32,37 | -0,27 | -0,25 | -1,37 | -1,84 | -15,88 | -22,56 | -14,85 | -20,91 |
| $M_s$ | -16,58 | -14,42 | 4,20 | 0 | 0,93 | 1,35 | 10,44 | 9,53 | -8,70 | -11,28 | -7,42 | -9,53 |
| $M_n$ | 13,68 | 14,42 | -4,20 | 0 | -0,76 | -1,35 | -10,44 | -9,53 | 7,17 | 11,28 | 7,42 | 9,53 |

Deuxième appui :

| Cas de charge | G | | | | Qw | | | | qe | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Sens X | | Sens Y | | Sens X | | Sens Y | | Sens X | | Sens Y | |
| | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 |
| $M_{w'}$ | -35,14 | -35,89 | -22,07 | -32,37 | -16,46 | -24,70 | -15,83 | -22,76 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $M_{e'}$ | -27,22 | -27,80 | -22,07 | -32,37 | 0 | 0 | 0 | 0 | -12,75 | -19,13 | -19,13 | -22,76 |
| $M_w$ | -34,53 | -35,25 | -22,07 | -32,37 | -15,19 | -22,75 | -14,91 | -20,91 | - 0,98 | -1,50 | -1,50 | -1,84 |
| $M_e$ | -27,92 | -28,53 | -22,07 | -32,37 | -1,45 | -2,22 | -0,92 | -1,84 | -11,62 | -17,41 | -17,41 | -20,91 |
| $M_s$ | 3,30 | 3,36 | 0 | 0 | 6,86 | 10,26 | 6,99 | 9,53 | -5,32 | -7,95 | -7,95 | -9,53 |
| $M_n$ | -3,30 | -3,36 | 0 | 0 | -6,86 | -10,26 | -6,99 | -9,53 | 5,32 | 7,95 | 7,95 | 9,53 |

*Tableau 79: Moments de base/ Calcul sans chapiteaux*

Nous évaluons par la suite les moments maximaux à répartir sur appuis et sur travée :

| | Sens X | | Sens Y | |
|---|---|---|---|---|
| | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 |
| **Appui A - Travée (A-B)** | | | | |
| M,eA,max (T.m) | -66,749 | -78,991 | -54,902 | -80,640 |
| M,wB (T.m) | -69,403 | **-81,730** | -52,170 | -75,081 |
| **Appui B - Travée (A-B)** | | | | |
| M,wB,max (T.m) | -70,885 | -83,992 | -53,555 | -77,850 |
| M,eA (T.m) | -66,498 | -78,607 | -52,833 | -76,402 |
| **Moment MAX Travée A-B** | | | | |
| Mu(l/2) | 110,859 | 129,837 | 89,286 | 106,623 |
| Mt, max | 42,909 | 49,669 | 36,784 | 30,882 |

*Tableau 80: Moments maximaux à répartir/ Calcul sans chapiteaux*

De ce qui est effort tranchant, nous obtenons les résultats suivants :

| | Appui A-Travée (A-B) | | Appui B - Travée (A-B) | | Appui A - Travée (A-B) | | Appui B - Travée (A-B) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 |
| M,eA | -66,75 | -78,99 | -66,50 | -78,61 | -54,90 | -80,64 | -52,83 | -76,40 |
| M,wB | -69,40 | -81,73 | -70,88 | -83,99 | -52,17 | -75,08 | -53,55 | -77,85 |
| V0 (T) | 52,48 | 62,20 | -52,48 | -62,20 | 42,27 | 61,44 | -42,27 | -61,44 |
| VA (T) | 52,16 | 61,88 | -53,00 | -62,84 | 42,60 | 62,10 | -42,35 | -61,61 |
| V0A (T) | **32,66** | **30,94** | **-33,18** | **-31,42** | **29,17** | **31,05** | **-21,17** | **-30,80** |
| V0A lim | 5,25 | 5,25 | 5,25 | 5,25 | 5,25 | 5,25 | 5,25 | 5,25 |

*Tableau 81: Calcul des efforts tranchants et vérification de poinçonnement / Calcul sans chapiteaux*

La condition du poinçonnement s'avère non vérifiée, ce qui nécessite de mettre en place des chapiteaux. Les résultats de calcul avec des chapiteaux sont comme suit.

Premier appui :

| Cas de charge | G | | | | Qw | | | | qe | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Sens X | | Sens Y | | Sens X | | Sens Y | | Sens X | | Sens Y | |
| | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 |
| $M_{w'}$ | -4,21 | -4,30 | -31,04 | -45,51 | -1,97 | -2,96 | -22,26 | -32,00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $M_{e'}$ | -39,31 | -40,16 | -24,78 | -36,33 | 0 | 0 | 0 | 0 | -18,42 | -27,63 | -17,77 | -25,55 |
| $M_w$ | -4,21 | -4,30 | -31,04 | -45,51 | -1,97 | -2,96 | -22,26 | -32,00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $M_e$ | -34,47 | -35,12 | -25,42 | -37,66 | -0,27 | -0,41 | -2,30 | -4,62 | -15,88 | -23,75 | -15,93 | -21,85 |
| $M_s$ | -16,58 | -16,88 | 3,07 | 4,30 | 0,93 | 1,39 | 10,93 | 15,00 | -8,70 | -13,01 | -8,73 | -11,97 |
| $M_n$ | 13,68 | 13,93 | -2,53 | -3,54 | -0,76 | -1,15 | -9,02 | -12,37 | 7,17 | 10,73 | 7,20 | 9,88 |

Deuxième appui :

| Cas de charge | G | | | | Qw | | | | qe | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Sens X | | Sens Y | | Sens X | | Sens Y | | Sens X | | Sens Y | |
| | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 |
| $M_{w'}$ | -39,31 | -40,16 | -24,78 | -36,33 | -18,42 | -27,63 | -17,77 | -25,55 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $M_{e'}$ | -30,77 | -31,43 | -24,78 | -36,33 | 0 | 0 | 0 | 0 | -14,42 | -21,63 | -17,77 | -25,55 |
| $M_w$ | -38,30 | -39,11 | -24,78 | -36,33 | -16,24 | -24,30 | -16,10 | -22,32 | -1,70 | -2,60 | -1,66 | -3,22 |
| $M_e$ | -31,98 | -32,69 | -24,78 | -36,33 | -2,60 | -3,97 | -1,66 | -3,22 | -12,38 | -18,52 | -16,10 | -22,32 |
| $M_s$ | 3,46 | 3,51 | 0 | 0 | 7,47 | 11,14 | 7,91 | 10,46 | -5,84 | -8,72 | -7,91 | -10,46 |
| $M_n$ | -2,85 | -2,90 | 0 | 0 | -6,16 | -9,19 | -6,52 | -8,63 | 4,82 | 7,19 | 6,52 | 8,63 |

*Tableau 82: Moments de base/ Calcul avec chapiteaux*

Ce qui donne des moments de base de valeurs :

| | Sens X | | Sens Y | |
|---|---|---|---|---|
| | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 |
| **Appui A - Travée (A-B)** | | | | |
| M,eA,max (T.m) | -70,773 | -83,668 | -61,684 | -90,577 |
| M,wB (T.m) | -76,074 | -89,264 | -57,617 | -82,543 |
| **Appui B - Travée (A-B)** | | | | |
| M,wB,max (T.m) | -78,636 | -93,167 | -60,114 | -87,385 |
| M,eA (T.m) | -70,364 | -83,045 | -58,232 | -83,634 |
| **Moment MAX Travée A-B** | | | | |
| Mu(l/2) | 110,859 | 129,837 | 89,286 | 106,623 |
| Mt, max | 37,640 | 43,683 | 31,362 | 23,535 |

*Tableau 83: Moments maximaux à répartir/ Calcul avec chapiteaux*

| | Appui A - Travée (A-B) | | Appui B - Travée (A-B) | | Appui A - Travée (A-B) | | Appui B - Travée (A-B) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 | Bande 1 | Bande 2 |
| M,eA | -70,77 | -83,67 | -70,36 | -83,04 | -61,684 | -90,578 | -58,232 | -83,634 |
| M,wB | -76,07 | -89,26 | -78,64 | -93,17 | -57,617 | -82,543 | -60,114 | -87,386 |
| V0 (T) | 52,48 | 62,20 | -52,48 | -62,20 | 42,266 | 61,440 | -42,266 | -61,440 |
| VA (T) | 51,85 | 61,54 | -53,46 | -63,40 | 42,747 | 62,390 | -42,488 | -61,883 |
| V0A (T) | 32,46 | 30,77 | -33,47 | -31,70 | 29,282 | 31,195 | -21,244 | -30,942 |
| V0A lim | 47,250 | 47,250 | 47,250 | 47,250 | 47,250 | 47,250 | 47,250 | 47,250 |

*Tableau 84: Calcul des efforts tranchants et vérification de poinçonnement / Calcul avec chapiteaux*

Nous répartissons donc les moments obtenus par bande et nous évaluons le ferraillage correspondant à chacune :

| | Demi-bande sur appuis | | | Demi-bande centrale | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | appui A | travée A-C | appui C | appui A | travée A-C | appui C |
| Mu | 0,2831 | 0,1129 | 0,2988 | 0,1415 | 0,1506 | 0,1887 |
| μ 0 | 0,3021 | 0,0860 | 0,3189 | 0,0674 | 0,0874 | 0,0899 |
| Alpha | 0,4636 | 0,1125 | 0,4976 | 0,0873 | 0,1145 | 0,1179 |
| Z 0 | 0,1711 | 0,2005 | 0,1682 | 0,2027 | 0,2004 | 0,2001 |
| ***A 1 (cm²)*** | ***38,06*** | ***12,95*** | ***40,86*** | ***16,06*** | ***17,28*** | ***21,69*** |
| | ***Armature supérieure*** | ***Armature inférieur*** | ***Armature supérieure*** | ***Armature supérieure*** | ***Armature inférieure*** | ***Armature supérieur*** |

*Tableau 85: Ferraillage manuel de la bande 1/ sens X*

| | Demi-bande sur appuis | | | Demi-bande centrale | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | appui A | travée A-C | appui C | appui A | travée A-C | appui C |
| Mu | 0,3347 | 0,1310 | 0,3540 | 0,1673 | 0,1747 | 0,2236 |
| μ 0 | 0,3571 | 0,0998 | 0,3778 | 0,0797 | 0,1014 | 0,1065 |
| Alpha | 0,5818 | 0,1317 | 0,6320 | 0,1040 | 0,1339 | 0,1411 |
| Z 0 | 0,1611 | 0,1989 | 0,1569 | 0,2013 | 0,1987 | 0,1981 |
| ***A 1 (cm²)*** | ***47,77*** | ***15,15*** | ***51,89*** | ***19,12*** | ***20,22*** | ***25,95*** |
| | ***Armature supérieure*** | ***Armature inférieur*** | ***Armature supérieure*** | ***Armature supérieure*** | ***Armature inférieure*** | ***Armature supérieur*** |

*Tableau 86: Ferraillage manuel de la bande 2/ sens X*

| | Demi-bande sur appuis | | | Demi-bande centrale | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | appui A | travée A-C | appui C | appui A | travée A-C | appui C |
| Mu | 0,2467 | 0,0941 | 0,2284 | 0,1234 | 0,1254 | 0,1443 |
| μ 0 | 0,2633 | 0,0731 | 0,2438 | 0,0553 | 0,0667 | 0,0647 |
| $\alpha$ | 0,3899 | 0,0950 | 0,3552 | 0,0712 | 0,0864 | 0,0837 |
| Z 0 | 0,1772 | 0,2020 | 0,1802 | 0,2040 | 0,2027 | 0,2030 |
| ***A 1 (cm²)*** | ***32,02*** | ***10,71*** | ***29,16*** | ***13,91*** | ***14,23*** | ***16,35*** |
| | ***Armature supérieure*** | ***Armature inférieur*** | ***Armature supérieure*** | ***Armature supérieure*** | ***Armature inférieure*** | ***Armature supérieur*** |

*Tableau 87: Ferraillage manuel de la bande 1/ sens Y*

| | Demi-bande sur appuis | | | Demi-bande centrale | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | appui A | travée A-C | appui C | appui A | travée A-C | appui C |
| Mu | 0,3623 | 0,0706 | 0,3321 | 0,1812 | 0,0941 | 0,2097 |
| μ 0 | 0,3866 | 0,0549 | 0,3543 | 0,0812 | 0,0501 | 0,0940 |
| $\alpha$ | 0,6548 | 0,0706 | 0,5753 | 0,1060 | 0,0642 | 0,1237 |
| Z 0 | 0,1550 | 0,2041 | 0,1617 | 0,2011 | 0,2046 | 0,1996 |
| ***A 1 (cm²)*** | ***53,76*** | ***7,96*** | ***47,24*** | ***20,72*** | ***10,58*** | ***24,17*** |
| | ***Armature supérieure*** | ***Armature inférieur*** | ***Armature supérieure*** | ***Armature supérieure*** | ***Armature inférieure*** | ***Armature supérieur*** |

*Tableau 88: Ferraillage manuel de la bande 2/ sens Y*

## B) Calcul sur Robot :

Pour déterminer le ferraillage de la dalle nous nous basons sur les résultats de la cartographie obtenus par le logiciel Robot dans les deux sens X et Y. Nous choisissons de faire cette étude pour le plancher haut du 7ème étage pour lequel nous avons déjà fait le calcul manuel de l'un de ses panneaux. Pour cela nous allons tout d'abord répartir la dalle en zones afin de faciliter la procédure de ferraillage. Le calcul se fera pour une section de 25 cm et une largeur égale à l'unité.

L'enrobage minimal exigé par la norme de feu en vigueur est de 2,5 cm, et donc la hauteur utile est $d = 25 - 2{,}5 = 22{,}5\ cm$. **L'espacement ne doit pas dépasser 33 cm et le taux minimal des armatures dans chaque direction est de 0,0006 (cas** des barres HA500), soit une section de 1,5 cm²/m.

Cartographie des moments du plancher :

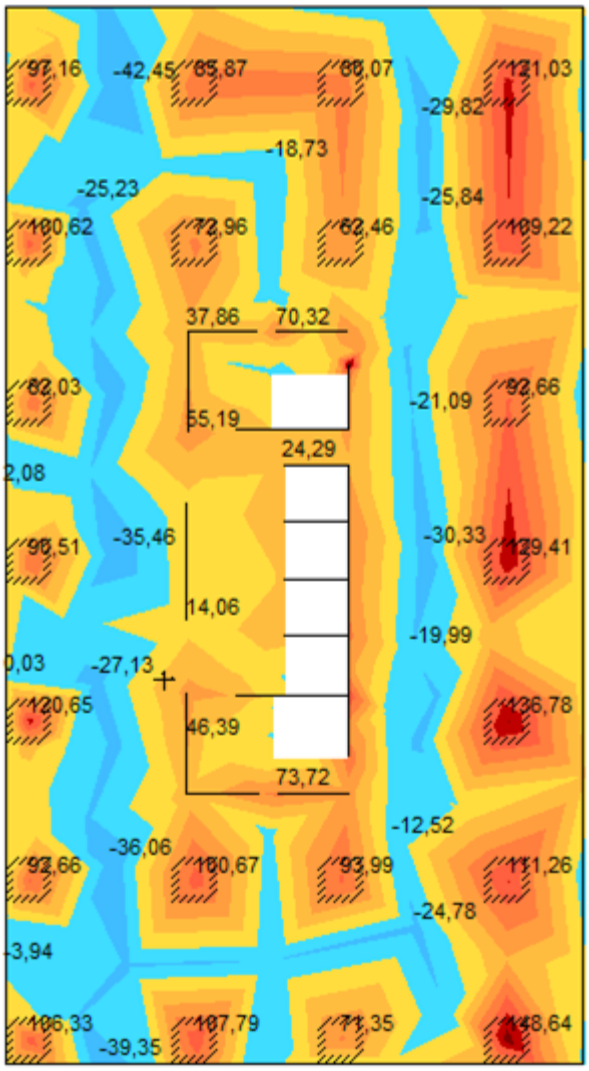



*Figure 31: Mxx (ACC+)*

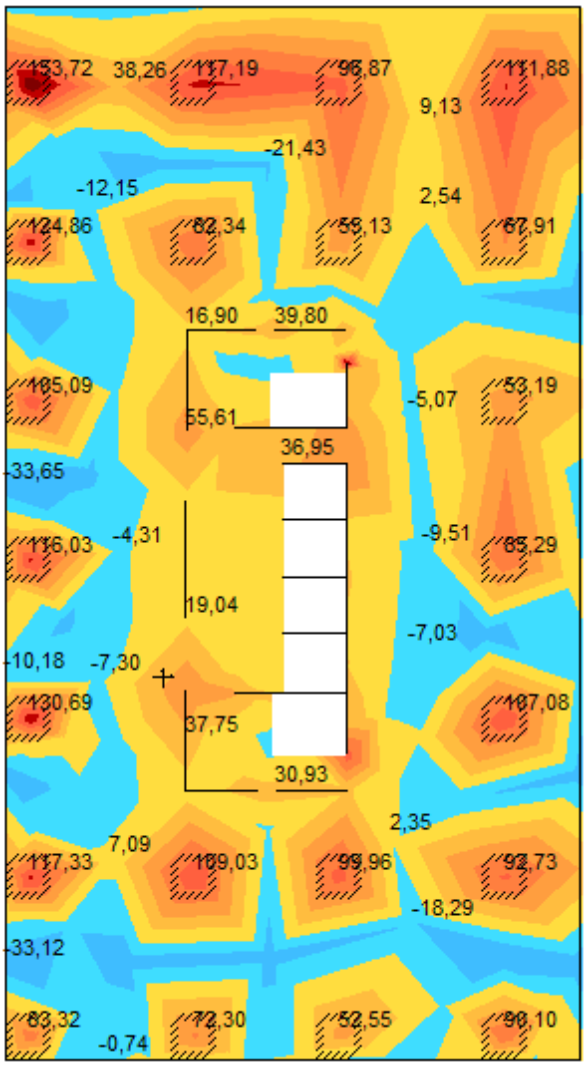



*Figure 32: Myy (ACC+)*

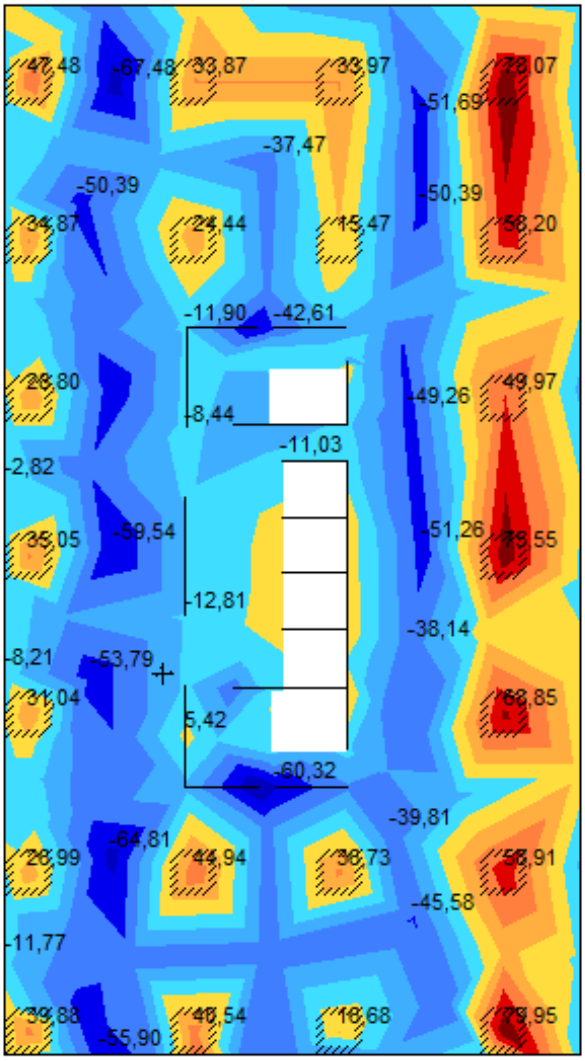



Figure 33: Mxx (ACC-)

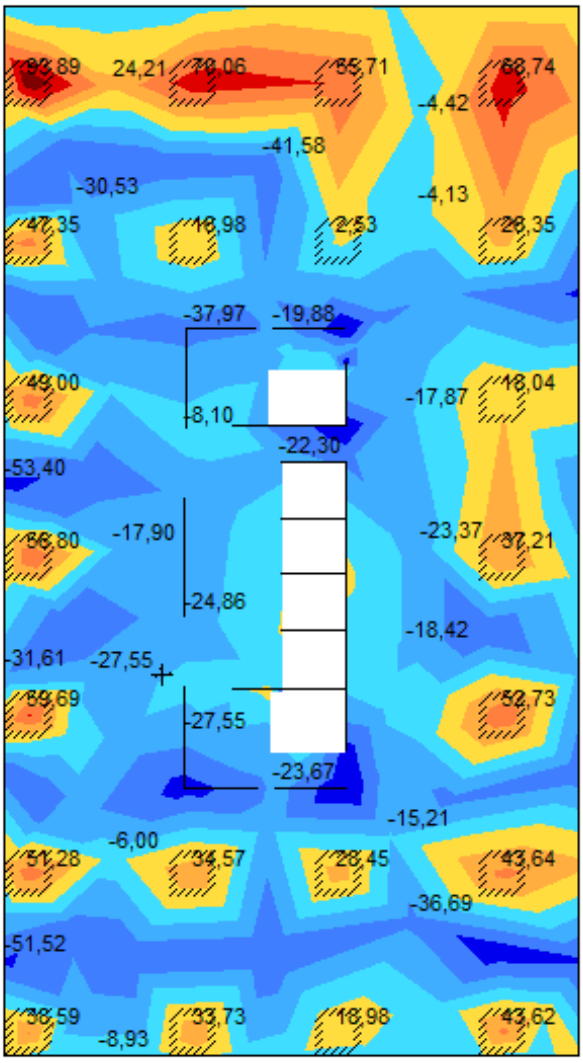



Figure 34: Myy (ACC-)

| | Appuis | M | μ | α | z (m) | At (cm²/m) | Ferraillage | Ar (cm²/m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SENS X | 1, 5, 8, 22, 24, 25, 26 | 0,11 | 0,128 | 0,557 | 0,175 | 14,47 | 5HA20 esp = 20 cm | 15,7 |
| | 2, 3, 12, 13, 21, 23 | 0,09 | 0,105 | 0,468 | 0,183 | 11,32 | 6HA16 esp = 16 cm | 12,06 |
| | 4 | 0,12 | 0,139 | 0,600 | 0,171 | 16,14 | 6HA20 esp = 16 cm | 18,84 |
| | 6, 27 | 0,07 | 0,081 | 0,374 | 0,191 | 8,41 | 8HA12 esp = 12 cm | 9,05 |
| | 7, 10, 11, 15, 19 | 0,06 | 0,070 | 0,324 | 0,196 | 7,05 | 9HA10 esp = 11 cm | 7,06 |
| | 9 | 0,08 | 0,093 | 0,422 | 0,187 | 9,84 | 9HA12 esp = 11 cm | 10,18 |
| | 14 | 0,02 | 0,023 | 0,113 | 0,215 | 2,14 | 5HA8 esp = 20 cm | 2,51 |
| | 16, 17 | 0,13 | 0,151 | 0,641 | 0,167 | 17,87 | 9HA16 esp = 11 cm | 18,09 |
| | 18 | 0,05 | 0,058 | 0,274 | 0,200 | 5,74 | 8HA10 esp = 12 cm | 6,28 |
| | 20 | 0,14 | 0,163 | 0,681 | 0,164 | 19,67 | 7HA20 esp = 14 cm | 21,99 |
| | 28 | 0,15 | 0,174 | 0,720 | 0,160 | 21,53 | 7HA20 esp = 14 cm | 21,99 |
| SENS Y | 1 | 0,15 | 0,174 | 0,720 | 0,160 | 21,53 | 7HA20 esp = 14 cm | 21,99 |
| | 2, 5, 13, 21 | 0,12 | 0,139 | 0,600 | 0,171 | 16,14 | 9HA16 esp = 11 cm | 18,09 |
| | 3, 4, 9, 20, 22, 23, 24, 28 | 0,11 | 0,128 | 0,557 | 0,175 | 14,47 | 5HA20 esp = 20 cm | 15,7 |
| | 6, 16, 25 | 0,08 | 0,093 | 0,422 | 0,187 | 9,84 | 9HA12 esp = 11 cm | 10,18 |
| | 7, 8, 26 | 0,07 | 0,081 | 0,374 | 0,191 | 8,41 | 8HA12 esp = 12 cm | 9,05 |
| | 10, 11, 18, 19 | 0,06 | 0,070 | 0,324 | 0,196 | 7,05 | 9HA10 esp = 11 cm | 7,06 |
| | 12, 14, 15, 27 | 0,05 | 0,058 | 0,274 | 0,200 | 5,74 | 8HA10 esp = 12 cm | 6,28 |
| | 17 | 0,13 | 0,151 | 0,641 | 0,167 | 17,87 | 9HA16 esp = 11 cm | 18,09 |

*Tableau 89 : Ferraillage des appuis du plancher haut du 7ème étage*

| | Panneaux | M | μ | α | z (m) | A (cm²/m) | Ferraillage | Ar (cm²/m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SENS X | 1, 13 | 0,07 | 0,081 | 0,374 | 0,191 | 8,41 | 8HA12 esp = 12 cm | 9,05 |
| | 2, 5, 12, 15, 17, 18 | 0,04 | 0,046 | 0,222 | 0,205 | 4,49 | 4HA12 esp = 25 cm | 4,52 |
| | 3, 9, 10 | 0,05 | 0,058 | 0,274 | 0,200 | 5,74 | 8HA10 esp = 12 cm | 6,28 |
| | 4, 6 | 0,03 | 0,035 | 0,168 | 0,210 | 3,29 | 7HA8 esp = 14 cm | 3,51 |
| | 7, 14, 16 | 0,06 | 0,070 | 0,324 | 0,196 | 7,05 | 9HA10 esp = 11 cm | 7,06 |
| | 8, 11 | 0,02 | 0,023 | 0,113 | 0,215 | 2,14 | 5HA8 esp = 20 cm | 2,51 |
| SENS Y | 1, 4, 6, 10, 17 | 0,03 | 0,035 | 0,168 | 0,210 | 3,29 | 7HA8 esp = 14 cm | 3,51 |
| | 2, 5 | 0,04 | 0,046 | 0,222 | 0,205 | 4,49 | 4HA12 esp = 25 cm | 4,52 |
| | 3 | 0,01 | 0,012 | 0,057 | 0,220 | 1,05 | 4HA8 esp = 25 cm | 2,01 |
| | 7 | 0,06 | 0,070 | 0,324 | 0,196 | 7,05 | 9HA10 esp = 11 cm | 7,06 |
| | 8, 9, 11, 12, 15 | 0,02 | 0,023 | 0,113 | 0,215 | 2,14 | 5HA8 esp = 20 cm | 2,51 |
| | 13, 14, 16, 18 | 0,05 | 0,058 | 0,274 | 0,200 | 5,74 | 8HA10 esp = 12 cm | 6,28 |

*Tableau 90 : Ferraillage des panneaux du plancher haut du 7ème étage*

| | Panneau | M | μ | α | z (m) | A (cm²/m) | Ferraillage | Ar (cm²/m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SENS X+ | Console | 0,06 | 0,041 | 0,195 | 0,272 | 5,07 | 5HA12 esp = 20 cm | 5,65 |
| SENS X- | Console | 0,04 | 0,027 | 0,132 | 0,279 | 3,29 | 7HA8 esp = 14 cm | 3,51 |
| SENS Y+ | Console | 0,09 | 0,061 | 0,286 | 0,261 | 7,92 | 7HA12 esp = 14 cm | 7,92 |
| SENS Y- | Console | 0,01 | 0,007 | 0,034 | 0,291 | 0,79 | 4HA8 esp = 25 cm | 2,01 |

*Tableau 91 : Ferraillage des consoles du plancher haut du 7ème étage*

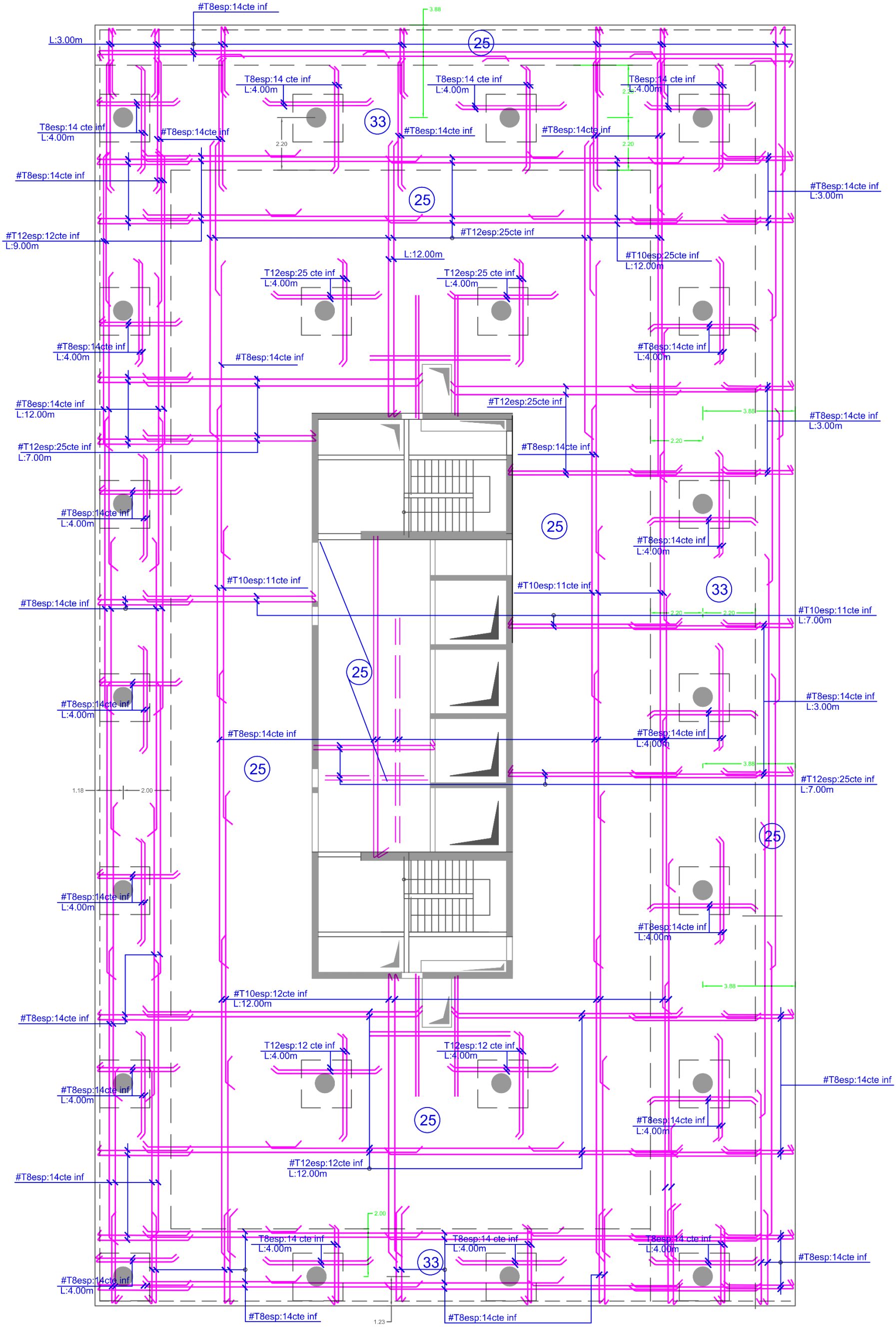



*Figure 35: Ferraillage inférieur du plancher haut 7ème étage*

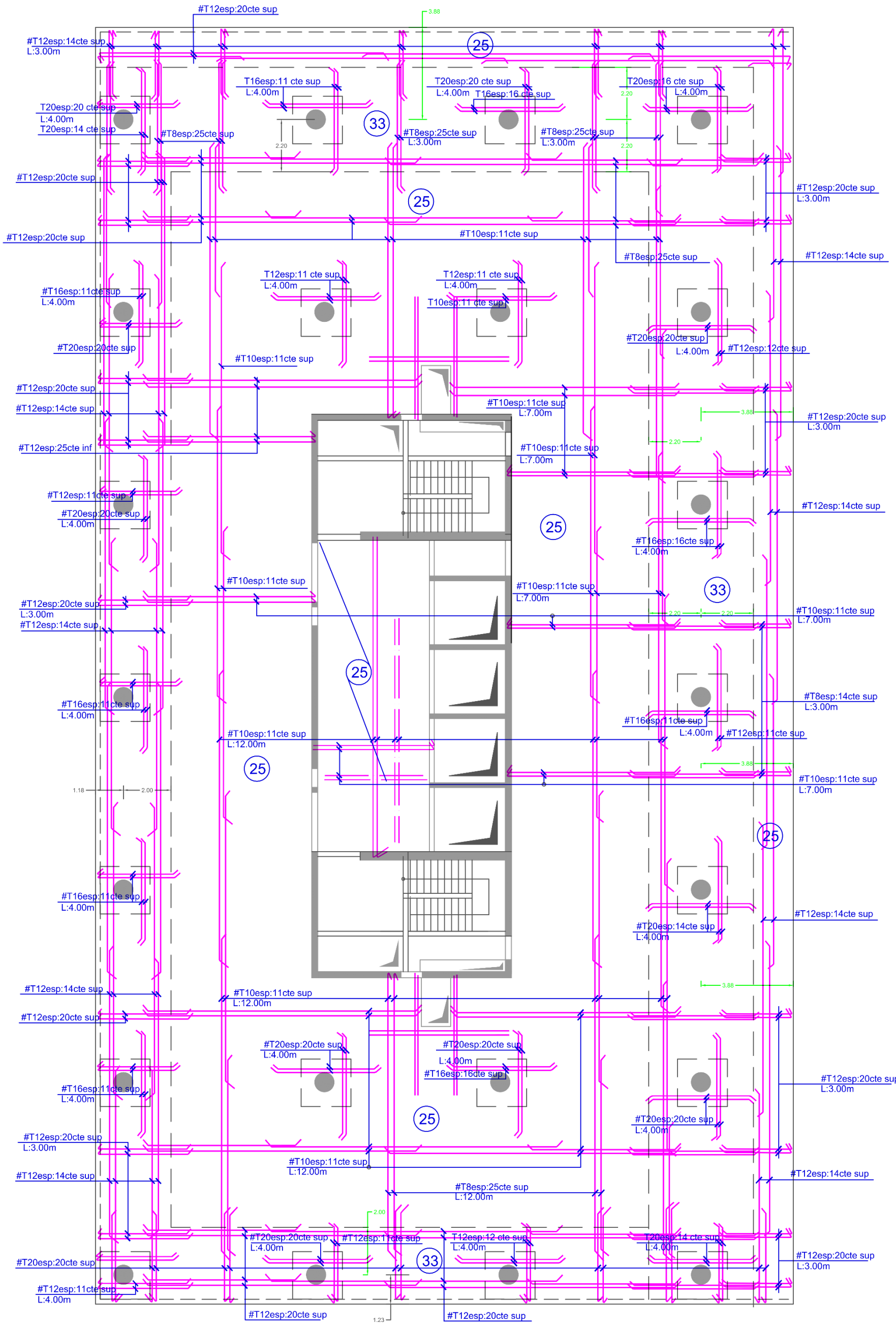



*Figure 36: Ferraillage supérieur du plancher haut 7ème étage*

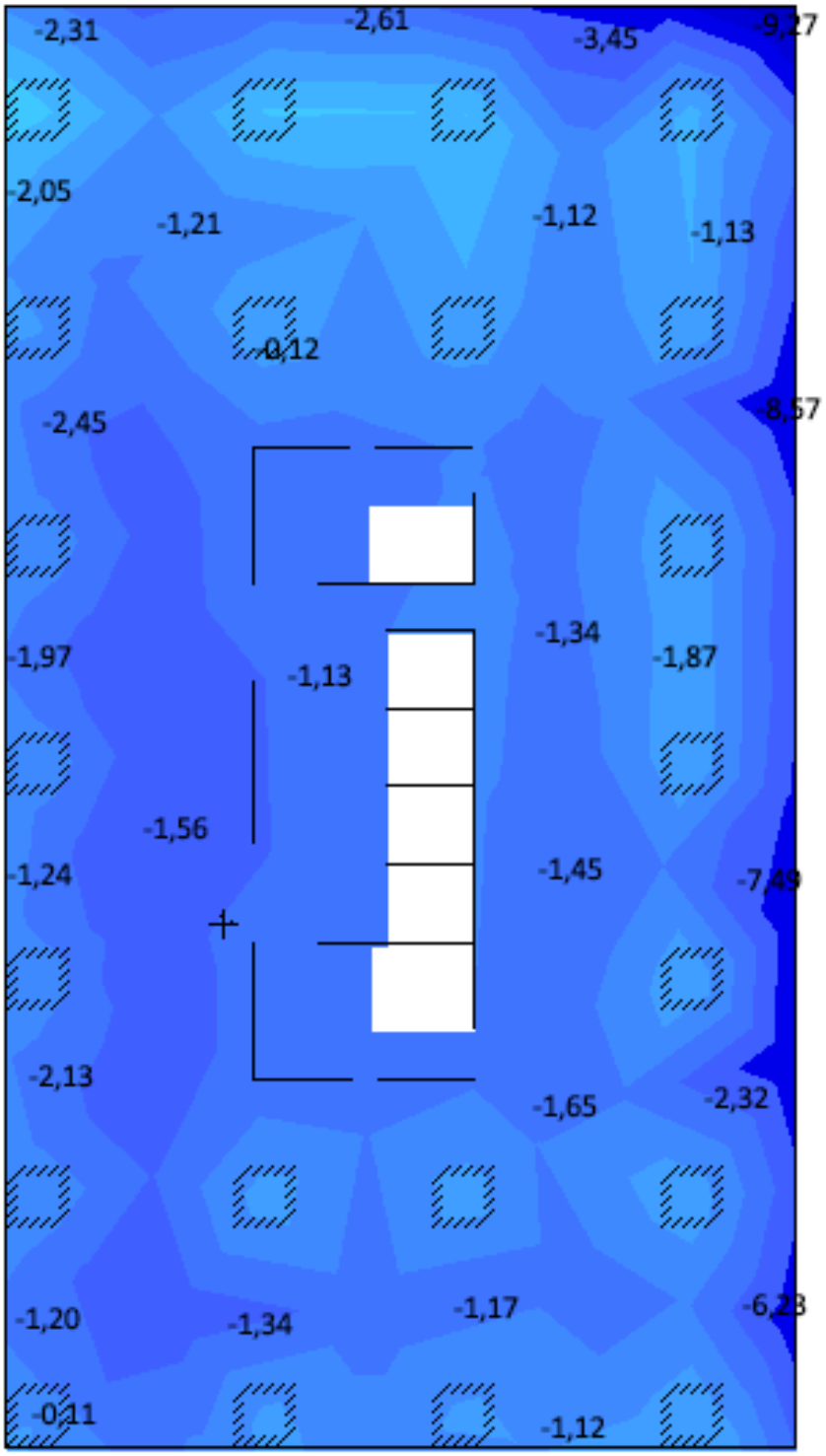



*Figure 37: Vérification des déformations de la dalle*

# ANNEXE 8 : DONNÉES THERMIQUES

## A) Inertie de bâtiment :

La classe d'inertie est définie par niveau de bâtiment, et c'est la classe d'inertie la plus faible (niveau le plus défavorable souvent représenté par le dernier) qui doit être utilisée pour les calculs. Pour définir la classe d'inertie du bâtiment, nous utilisons le tableau ci-dessous en fonction des définitions des parois :

| Classe d'inertie | Plancher bas | Plancher haut | Paroi verticale |
|---|---|---|---|
| Très lourde | lourd | lourd | Lourde |
| Lourde | lourd | lourd | - |
| Lourde | - | lourd | Lourd |
| Lourde | lourd | - | lourd |
| Moyenne | lourd | - | - |
| Moyenne | - | lourd | - |
| Moyenne | - | - | Lourd |
| Très légère | - | - | - |

*Tableau 92: Classe d'inertie des bâtiments*

Source : http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/bilan_th.htm

Nous définissons les différents types de planchers comme suit :

**Plancher haut lourd :**

- plancher sous toiture, béton plein avec une épaisseur minimale de 8 cm, isolation par l'extérieur ;
- sous face de plancher intermédiaire, béton plein avec une épaisseur minimale de 15 cm sans isolant et sans faux plafond.

**Plancher bas lourd :**

- face de plancher intermédiaire sans revêtement à effet thermique (grosse moquette de plus de 6 mm, parquet bois). Béton plein avec une épaisseur minimale de 15 cm sans isolant, chape ou dalle de béton sur entrevous lourds (parpaings, terre cuite), sur béton cellulaire armé ;
- plancher bas avec isolant en sous face et sans revêtement à effet thermique. Béton plein avec une épaisseur minimale de 10 cm, chape ou dalle de béton sur entrevous lourds (parpaings, terre cuite), sur béton cellulaire armé, dalle de béton avec une épaisseur minimale de 5 cm sur entrevous en matériau isolant.

**Paroi verticale lourde :**

Un niveau de bâtiment possède une paroi verticale lourde si elle remplit l'une ou l'autre des conditions suivantes :

- lorsque la surface du mur est au moins égale à 0,9 fois la surface du plancher, murs de façade et pignons isolés par l'extérieur avec à l'intérieur :
  - béton plein avec une épaisseur minimale de 7 cm ;
  - ou parpaings d'épaisseur minimale de 11 cm ;
  - ou briques pleines ou perforées d'épaisseur minimale de 10,5 cm.
- murs extérieurs à isolation répartie d'une épaisseur minimale de 30 cm et cloisonnement intérieur autre que Placo plâtre (Placo style) ;
- lorsque la taille moyenne des locaux est inférieure à 30 m² ;

- lorsque l'ensemble du doublage intérieur des murs extérieurs (contre cloison) et du cloisonnement est réalisé en brique enduite de plâtre ou en carreaux de plâtre.

## B) Températures et degrés jours des villes marocaines :

Ces valeurs ont servi à des données d'entrée pour notre application ; Ils sont tirés des mesures effectués par la direction météologique au Maroc :

| Ville | Zone | Température de base extérieure Hivernale (°C) | Température de base extérieure estivale (°C) | DJCH | DJCL |
|---|---|---|---|---|---|
| AL-HOUCEIMA | 2 | 6,1 | 28,3 | 765 | 269 |
| BENI MELLAL | 3 | 1,7 | 39,3 | 863 | 864 |
| BOUARFA | 6 | 2,7 | 39,2 | 1195 | 1041 |
| CASABLANCA | 1 | 7,2 | 27,4 | 578 | 274 |
| CHAOUEN | 2 | 2,9 | 34,3 | 1115 | 420 |
| DAKHLA | 1 | 13,4 | 26,6 | 49 | 287 |
| EL-JADIDA | 1 | 7,4 | 25,3 | 539 | 206 |
| ESSAOUIRA | 1 | 11 | 23,6 | 525 | 45 |
| FES | 3 | 2 | 35,6 | 1086 | 550 |
| GUELMIM | 1 | 7,5 | 34,4 | 367 | 628 |
| IFRANE | 4 | 2,5 | 31,1 | 2219 | 379 |
| KALAAT TADLA | 3 | 2,2 | 39,7 | 836 | 942 |
| KENITRA | 1 | 6,9 | 28,8 | 658 | 320 |
| KHOURIBGA | 3 | 4,8 | 35 | 1009 | 613 |
| LAAYOUNE | 1 | 10,7 | 31,7 | 99 | 525 |
| LARACHE | 2 | 6,4 | 28,3 | 761 | 329 |
| MARRAKECH | 5 | 4,2 | 38 | 590 | 950 |
| MEKNES | 3 | 3,4 | 34,7 | 1036 | 507 |
| MIDELT | 4 | 1,8 | 34,5 | 1640 | 419 |
| NADOR | 2 | 5,3 | 32,5 | 629 | 463 |
| NOUACEUR | 1 | 3,5 | 30,9 | 778 | 364 |
| OUARZAZATE | 6 | 1,7 | 38,7 | 884 | 1059 |
| OUJDA | 3 | 4,3 | 35,8 | 1042 | 552 |
| RABAT | 1 | 6,1 | 27,8 | 771 | 193 |
| RACHIDIA | 6 | 2 | 40,9 | 994 | 1260 |
| SAFI | 1 | 7,9 | 29,6 | 568 | 369 |
| SETTAT | 1 | 4 | 33,6 | 896 | 451 |
| SIDI IFNI | 1 | 13,7 | 24,1 | 199 | 188 |
| SIDI SLIMANE | 3 | 4,9 | 35,5 | 598 | 734 |
| TANGER | 2 | 7,3 | 30,5 | 725 | 380 |
| TAN-TAN | 6 | 11 | 27,1 | 233 | 289 |
| TAROUDANT | 1 | 6,8 | 26,8 | 365 | 782 |
| TAZA | 3 | 3 | 37,1 | 928 | 642 |
| TETOUAN | 2 | 8,1 | 30,9 | 767 | 405 |
| TIZNIT | 1 | 7,5 | 31,5 | 435 | 442 |

*Tableau 93: Données thermiques d'entrée*


www.cours-genie-civil.com

## C) Coefficient réducteur des apports de chaleur « n » :

- Calcul du coefficient $q = \frac{Apports}{Déperditions} = \frac{Q_G}{\sum H}$ ;
- $\begin{cases} n = \frac{1-q^a}{1-q^{a+1}}; si\ q \neq 1 \\ n = \frac{a}{a+1}; si\ q = 1 \end{cases}$

Avec :

- $a = 1 + \frac{C_m}{16 \times \sum H\ (W/K)}$

# ANNEXE 9 : DONNÉES ACOUSTIQUES DES MATÉRIAUX

De ce qui est vitrage nous choisissons un double vitrage à vitres simples 8-10-6.

| Type de vitrage | Indice d'affaiblissement acoustique (dB) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1 KHz | 2 KHz | 4 KHz | $R_w$ (C ; $C_{tr}$) (dB) |
| Vitres simples (mm) | | | | | | | |
| 3 | 14 | 19 | 25 | 29 | 33 | 25 | 28 (-1 ;-4) |
| 4 | 17 | 20 | 26 | 32 | 33 | 26 | 29 (-2 ;-3) |
| 5 | 19 | 22 | 29 | 33 | 29 | 31 | 30 (-1 ;-2) |
| 6 | 18 | 23 | 30 | 35 | 27 | 32 | 31 (-2 ;-3) |
| 8 | 20 | 24 | 29 | 34 | 29 | 37 | 32 (-2 ; -3) |
| 10 | 23 | 26 | 32 | 31 | 32 | 39 | 33 (-2 ; -3) |
| 12 | 27 | 29 | 31 | 32 | 38 | 47 | 34 (0 ; -2) |
| Vitres feuilletées (mm), stratifié plastique (0 ;5) | | | | | | | |
| 6+ | 20 | 23 | 29 | 34 | 32 | 38 | 32 (-1 ; -3) |
| 8+ | 20 | 25 | 32 | 35 | 34 | 42 | 33 (-1 ;-3) |
| 10+ | 24 | 26 | 33 | 33 | 35 | 44 | 34 (-1 ;-3) |
| Double vitrage à vitres simples ou feuilletées (mm), cavité remplie d'air de 6 à 16 mm | | | | | | | |
| 4-(6-16)-4 | 21 | 17 | 25 | 35 | 37 | 31 | 29 (-1 ; -4) |
| 6-(6-16)-4 | 21 | 20 | 26 | 38 | 37 | 39 | 32 (-1 ; -4) |
| 6-(6-16)-6 | 20 | 18 | 28 | 38 | 34 | 38 | 31 (-1 ; -4) |
| 8-(6-16)-4 | 22 | 21 | 28 | 38 | 40 | 47 | 33 (-1 ; -4) |
| 8-(6-16)-6 | 20 | 21 | 33 | 40 | 36 | 48 | 35 (-2 ; -6) |
| 10-(6-16)-4 | 24 | 21 | 32 | 37 | 42 | 43 | 35 (-2 ; -5) |
| 10-(6-16)-6 | 24 | 24 | 32 | 37 | 37 | 44 | 35 (-1 ; -3) |
| 6-(6-16)-6+ | 20 | 19 | 30 | 39 | 37 | 46 | 33 (-2 ;-5) |
| 6-(6-16)-10+ | 24 | 25 | 33 | 39 | 40 | 49 | 37 (-1 ;-5) |

*Tableau 94: Indices d'affaiblissement de vitrage NF EN 12354-3 Annexe B*

Pour l'Alucobond nous choisissons une épaisseur de 6mm.

| Caractéristiques | Norme | Unité | ep 3 mm | ep 4 mm | ep 6 mm |
|---|---|---|---|---|---|
| Limite de résistance | DIN 53293 | [cm³/m] | 1,25 | 1,75 | 2,75 |
| Module d'élasticité | EN 1999 1-1 | [N/mm²] | 70'000 | | |
| Résistance à la traction | EN 485-2 | [N/mm²] | $R_m \geq 130$ | | |
| Allongement à la rupture | EN 485-2 | [%] | $A_{50} \geq 5$ | | |
| Coefficient de dilatation thermique | EN 1999 1-1 | | 2,4 mm/m pour une différence de température 100ºC | | |
| Coefficient d'adsorption du son | ISO 354 | | 0,05 | | |
| Amortissement phonique | ISO/DIS 717-1, EN ISO 140-3 | [dB] | 25 | 26 | 27 |
| Résistance thermique | DIN 52612 | [m²K/W] | 0,0069 | 0,0103 | 0,0172 |
| Transmission de la chaleur | DIN 4108 | [W/m²K] | 5,65 | 5,54 | 5,34 |
| Résistance en température | | [°C] | -50 à +80 | | |

*Tableau 95: Données techniques de l'Alucobond*