

République Algérienne Démocratique & Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur
& de la Recherche Scientifique**

Université de khemis-Miliana

Faculté : des Sciences et de la Technologie

Département : de la Technologie



Mémoire de fin d'étude

*En vue de l'obtention d'un Diplôme de **Master** en Génie Civil
Spécialité: Structure*

Thème :

**Etude d'un bâtiment en béton armée
(R+9+Sous sol) réalisé avec le système
de coffrage tunnel**

Réalisé par :

- DERGHAM Louiza
- RAHMOUNE Djahida

Encadré par :

- Dr. KOUIDER DJELLOUL Omar

Promotion 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté de commencer et de terminer ce mémoire.

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mr KOUIDER DJELLOUL**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire. Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

Et enfin, que nos chers parents et familles, et bien avant tout. Trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices, aides, soutien et encouragement afin de nous assurer cette formation de licencié dans les meilleures conditions.

Dédicace

*C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux
Personnes les plus chères au monde, mes chers parents pour leurs
amour Et bonté et que sans eux je n'aurai jamais pu atteindre mon
objectif, que Dieu me les garde*

À... Mon cher père que dieu le guérisse, Ma chère mère,

Mes chères frère : yahia et aziz

Mon cher mari billal

Toute la famille dergham ; ouradi et ait mehdi

Mr mohamed ben aissa et Mr mohamed ben rabah

Ma binette : djahida.

Mes chères copines

Tous ceux qui me connaissent et m'aiment...

*À toute la promotion 2020-2021 de génie
civil (structure).*

Louiza

Dédicace

*C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux
Personnes les plus chères au monde, mes chers parents pour leurs
amour Et bonté et que sans eux je n'aurai jamais pu atteindre mon
objectif, que Dieu me les garde*

*À... Mon cher père que dieu le guérisse, Ma chère mère,
Mes chères frere : Fride, Maamer, Ab rahman,*

À mes chères soeurs: Linda, Fatma, Aicha

Toute la famille Rahmoune

Mr : Benrabah Mohamed

Ma binôme : louiza

Mes chères copines

Tous ceux qui me connaissent et m'aiment...

*À toute la promotion 2020-2021 de génie
civil (structure).*

Djahida

LISTE DES SYMBOLES

- A : Coefficient d'accélération de zone, Coefficient numérique en fonction de l'angle de frottement.
- A_s : Aire d'une section d'acier.
- A_t : Section d'armatures transversales.
- B : Aire d'une section de béton.
- \varnothing : Diamètre des armatures, mode propre.
- C : Cohésion.
- Q : Charge d'exploitation.
- γ_s : Coefficient de sécurité dans l'acier.
- γ_b : Coefficient de sécurité dans le béton.
- σ_s : Contrainte de traction de l'acier.
- σ_{bc} : Contrainte de compression du béton.
- $\bar{\sigma}_s$: Contrainte de traction admissible de l'acier.
- $\bar{\sigma}_{bc}$: Contrainte de compression admissible du béton.
- T : L'effort de traction
- β : Coefficient de pondération.
- σ_{sol} : Contrainte du sol.
- G : Charge permanente.
- E.L.U : Etat limite ultime.
- E.L.S : Etat limite service.
- N_{ser} : Effort normal pondéré aux états limites de service.
- N_u : Effort normal pondéré aux états limites ultime.
- T_u : Effort tranchant
- T : Effort tranchant, Période.
- S_t : Espacement.
- λ : Elancement.
- e : Epaisseur, Indice des vides.
- P : Force concentrée.
- f : Flèche.

- \bar{f} : Flèche admissible.
- L : Longueur ou portée.
- L_f : Longueur de flambement.
- I_p : Indice de plasticité.
- I_c : Indice de consistance.
- d : Hauteur utile.
- F_e : Limite d'élasticité de l'acier.
- M_u : Moment à l'état limite ultime.
- M_{ser} : Moment à l'état limite de service.
- M_t : Moment en travée.
- M_a : Moment sur appuis.
- M_0 : Moment en travée d'une poutre reposant sur deux appuis libres, Moment a la base.
- I : Moment d'inertie..
- M : Moment, Masse.
- E_{ij} : Module d'élasticité instantané.
- E_{vj} : Module d'élasticité différé.
- E_s : Module d'élasticité de l'acier.
- f_{c28} : Résistance caractéristique à la compression du béton à 28 jours d'age.
- f_{t28} : Résistance caractéristique à la traction du béton à 28 jours d'age.
- F_{cj} : Résistance caractéristique à la compression du béton à j jours d'age.
- Y : Position de l'axe neutre.
- I_0 : Moment d'inertie de la section totale homogène
- ρ : Poids volumique
- α : Elancement d'un panneau de dalle
- η : Coefficients de fissuration
- θ : Coefficient d'application de charge.
- b : La largeur de la table de compression
- i : Rayon de giration
- B : Section de béton du poteau.
- a : l'épaisseur de voile
- h_e : hauteur libre d'étage
- g : giron

- C_p : facteur de force horizontale
- W_p : poids de l'acrotère
- F_p : l'action de la force sismique applique sur l'acrotère.
- H_0 : épaisseur de la dalle
- ν : Coefficient de Poisson
- ξ : pourcentage d'amortissement critique
- E : charges sismiques.
- T_1, T_2 : périodes caractéristiques associées à la catégorie de site
- Q : facteur de qualité
- D : facteur d'amplification dynamique moyen
- H_N : c'est la hauteur mesurée en mètres à partir de la base de la structure jusqu'au dernier niveau(N)
- C_T : coefficient, fonction du système de contreventement, du type de remplissage
- X_i : l'abscisse du centre de torsion
- Y_i : l'abscisse du centre de torsion
- R : l'abscisse du centre de torsion

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Schéma du système coffrage tunnel	3
Figure I.2 : Réalisation des ouvertures sur un coffrage	4
Figure I.3 : Assemblage de deux demi-coquilles	5
Figure I.4 : Ensemble roulette de translation et verin de mise à niveau.....	5
Figure I.5 : Roulette de triangulation et verin de mise à l'aplomb.....	5
Figure I.6 : Contrefiche articulée facilitant le décoffrage	5
Figure I.7 : Bande additionnelle	5
Figure I.8 : Coffrage d'amorce du voile supérieur	6
Figure I.9 : Tige de liaison entre panneaux	6
Figure I.10 : Abouts de voile.....	7
Figure I.11 : Cadre de réservation	7
Figure I.12 : Schéma de passerelle de décoffrage	8
Figure I.13 : Cônes d'entretoise	8
Figure I.14 : Les talonnettes de banches	9
Figure I.15 : Les écarteurs de nappes d'armature.....	9
Figure I.16 : Ecarteurs pour armatures verticales.....	10
Figure I.17 : Les sabots de coffrage	10
Figure I.18 : Les tiges de coffrage.....	11
Figure I.19 : Les aimants de mannequin	11
Figure I.20 : Mise en œuvre des fondations (radier général)	11
Figure I.21 : Ferrailage des voiles	12
Figure I.22 : La mise en place des demi-coquilles	13
Figure I.23 : Mise en place des divers réserves.....	13
Figure I.24 : Solidarisé les deux demi coquilles	14
Figure I.25 : Mise en place de la 3ème demi coquille	14
Figure I.26 : Mise en place du ferailage des dalles et Coulage du béton de plancher et des voiles	15

Figure I.27 : Le décoffrage	16
Figure I.28 : La mise en place des passerelles de sécurité	16
Figure I.29 : Exemple des batiments realisés en coffrage tunnel	19
Figure II -1 : Schéma du plancher.....	22
Figure II -2 : Vue en plan des escaliers.....	22
Figure II.3 : La coupe verticale des escaliers	23
Figure II.4 : Schéma d'Ascenseur.....	23
Figure II.5 : l'acrotère	24
Figure II.6 : Coupe transversale d'un mur de façade.....	24
Figure II.7 : Eprouvettes cylindriques	27
Figure II.8 : Ecrasement d'éprouvettes de béton avec une presse hydraulique.....	27
Figure II.9 : Digramme contraintes–déformations de l'acier à l'ELU.	28
Figure II.10 : Digramme contraintes– déformations de l'acier à l'ELS.	30
Figure III.1 : Dimension d'une dalle pleine.	32
Figure IV.1 : Schéma d'un panneau continu au-delà de ses appuis.....	38
Figure IV.2 : Schéma des panneaux de rive.....	39
Figure IV.3 : Distribution des panneaux plancher terrasse	39
Figure IV.4 : Distribution des panneaux plancher étage courant.....	40
Figure IV.5 : Dalle sur 4 appuis	41
Figure IV.6 : Dalle sur 2 appuis	43
Figure IV.7 : Schéma de ferrailage plancher RDC	45
Figure IV.8 : Schéma de ferrailage plancher étage courant	46
Figure IV.9 : Schéma de ferrailage plancher terrasse	47
Figure IV.10 : Schéma de ferrailage plancher sous sol.....	48
Figure V.1 : Coupe Verticale sur l'acrotère	50
Figure V.2 : Schéma statique.....	50
Figure V.3 : Diagramme des efforts à(E.L.U).....	52
Figure V.4 : Schéma de ferrailage de l'acrotère	55
Figure V.5 :Schéma de l'escalier	56
Figure V.6 :Dimensionnement d'escalier	56
Figure V.7 : Diagrammes des sollicitations à L'ELU	58
Figure V.8 : Diagrammes des sollicitations à L'ELS	59

Figure VI.1 : Spectre de réponse	74
Figure VI.2 : Vue en plan de la structure sur ETABS.....	77
Figure VI.3 : Image 3D de la structure sur ETABS	77
Figure VII-1 : Disposition des armatures verticales dans les voiles	86
Figure VII-2 : Schéma de disposition des voiles	92
Figure VII-3 : Schéma de ferrailage du voile (V27 ;29)	94
Figure VIII.1 : Les types de fondation superficielle.....	117
Figure VIII.2 : Disposition des panneaux du radier.....	119
Figure VIII.3 : Détail des longueues des nervures.....	121
Figure VIII.4 : Contraintes sous le radier.	124
Figure VIII.5 : Schéma de ferrailage du radier.....	127
Figure VIII.6 : Ferrailage des nervures sens y-y	128
Figure VIII.7 : schéma statique du débord	129
Figure VIII. 8 : Voile périphérique.....	130

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1: Valeurs de la limite d'élasticité garantie f_e	29
Tableau III.1 : Charge permanentes du plancher terrasse	34
Tableau III.2 : Charge permanentes du plancher étage courant et RDC	34
Tableau III.3 : les sollicitations à L'ELU et à L'ELS dans les différents planchers	35
Tableau IV.1 : Ferrailage de la dalle pleine sur 4 appuis	42
Tableau IV.2 : Ferrailage de la dalle pleine sur 2 appuis	44
Tableau IV.3 : Vérification des contraintes	49
Tableau V.1 : Ferrailage de l'acrotère	53
Tableau V.2 : Evaluation des charges et surcharges pour le palier.....	57
Tableau V.3 : Evaluation des charges et surcharges pour le paillasse	57
Tableau V.4 : Combinaisons des charges	58
Tableau V.5 : Caractéristiques géométriques et mécaniques.....	59
Tableau V.6 : Ferrailage de l'escalier	59
Tableau V.7 : Vérification des contraintes	59
Tableau V.8 : Ferrailage de la poutre palière.....	60
Tableau V.9 : Tableau récapitulatif des résultats de ferrailage	63
Tableau V.10 : Vérification des contraintes de la dalle dans les deux sens.....	65
Tableau VI.1 : Valeur de T_1 et T_2	73
Tableau VI.2 : Détermination du facteur de qualité Q de la structure	73
Tableau VI.3 : Période et facteurs de participation massique du modèle.....	79
Tableau VI.4 : Caractéristiques massiques et géométriques.....	81
Tableau VI.5 : Déplacement horizontal de chaque niveau	82
Tableau VI.6 : Déplacements latéraux inter étages	83
Tableau VI.7 : Calcul du coefficient Θ	84
Tableau. VIII.1: Sections des semelles filantes.....	118
Tableau VIII.2 : Les contraintes	125
Tableau VIII.3: Calcul des moments.....	125
Tableau VIII. 4: Ferrailage a ELU	126
Tableau VIII.5 : Vérification des contraintes.....	126
Tableau VIII. 6 : Ferrailage des nervures suivant y-y.....	127

Tableau VIII.7 : Vérification des contraintes	128
Tableau VIII.8 : Vérification des contraintes,	129
Tableau VIII.9 : Ferrailage du voile périphérique	131

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur le système de coffrage tunnel

I.1- Introduction	2
I.2- Le coffrage tunnel	2
I.2.1- Description	2
I.2.2- Fonctionnement.....	2
I.2.3- La taille standard du tunnel	3
I.2.4- Réservations pour ouvertures	4
I.3- Les accessoires de coffrage tunnel	4
I.4- Etapes d'exécutions	12
I.5- Domaine d'application	20
I.6- Les avantages et les inconvénients du coffrage tunnel	20

Chapitre II : Présentation de l'ouvrage

II.1- Introduction	21
II.2- Caractéristiques géométriques de la structure	21
II.3- Données du site	21
II.4- Conception de la structure	21
II.4.1- Revêtement	21
II.4.2- Les planchers	22
II.4.3- Les escaliers	22
II.4.4- Ascenseur	23
II.4.5- L'acrotère	24
II.4.6- Façades.....	24
II.5- Caractéristiques mécanique des matériaux	25

II.5.1- Le béton	25
II.5.2- Liant hydraulique	25
II.5.3- Les granulats (gravier et sable)	25
II.5.4- L'eau de gâchage.....	26
II.5.5- Les adjuvants pour bétons.....	26
II.6- Résistance du béton.....	26
II.6.1- Résistance caractéristique a la compression a 28 jours	26
II.6.2- Résistance caractéristique a la traction a j jours.....	27
II.6.3- Module de déformation longitudinale du béton	27
II.6.4- Le module de déformation longitudinale différée	28
II.6.5- Contraintes limites de compression	28
II.7- Acier.....	29
II.7.1- la limite d'élasticité garantie f_e	29
II.7.2- Contraintes limites	30
II.8- Hypothèses de calcul.....	31

Chapitre III : Pré-dimensionnement des éléments structuraux et descente des charges

III.1- Introduction	32
III.2- Pré-dimensionnement de la dalle	32
III.2.1- Plancher à dalle pleine.....	32
III.2.2- Calcule l'épaisseur	33
III.3- Evaluation des charges	34
III.3.1- Les charges permanentes	34
III.3.2- Les charges d'exploitations	34
III.3.3- Calcul les sollicitations.....	35
III.4- Pré-dimensionnement des voiles	35
III.4.1- Voile porteur et de contreventement	35
III.4.2- Voile périphérique	35

Chapitre IV : Etude des planchers

IV.1- Introduction	36
IV.2- Calcul les dalles	36
IV.2.1- Principe de calcul.....	36
IV.2.2- Hypothèses de calcul.....	36
IV.2.3- Les conditions d'appuis	38
IV.2.4- Distribution des panneaux de dalle sur le plan	39
IV.2.5- Les panneaux les plus défavorables	40
IV.3- Exemple de calcul.....	41
IV.3.1- Panneau dalle travail sur les deux directions	41
IV.3.2- Panneau dalle travaille dans un seul sens.....	43
IV.4- Les conclusions de ferrailage.....	44
IV.4.1- Conclusion sur le ferrailage de la dalle plancher RDC	44
IV.4.2- Conclusion sur le ferrailage de la dalle plancher étage courant	45
IV.4.3- Conclusion sur le ferrailage de la dalle plancher terrasse	46
IV.4.4- Conclusion sur le ferrailage de la plancher Ssol	48
IV.5- Vérification De La Contrainte Dans Le Béton	49

Chapitre V : Etude des éléments non structuraux

V.1- Introduction.....	50
V.2- L'acrotère	50
V.2.1- Calcul de l'acrotère.....	50
V.2.2- Evaluation des charges	51
V.2.3- Ferrailage de l'acrotère.....	52
V.2.4- Vérification de la section d'acier	52
V.2.5- Vérification des contraintes	54
V.3- Escalier	55
V.3.1- Définition des éléments d'un escalier	55
V.3.2- Dimensionnement d'escalier	56
V.3.3- Descente des charges des escaliers	57

V.3.4- Les réactions d'appuis	58
V.3.5- calcul des efforts tranchants et des moments fléchissons	58
V.3.6- Ferrailage des escaliers.....	59
V.3.7- La poutre palière.....	60
V.3.8- descente de charge.....	60
V.3.9- calcul des sollicitations	60
V.3.10- Schéma de ferrailage des escaliers	61
V.4- Ascenseur	61
V.4.1- Pré-dimensionnement	62
V.4.2- Détermination des charges et surcharges	62
V.4.3- Combinaison des charges	62
V.4.4- Calcul des efforts	62
V.4.5- Ferrailage de la dalle.....	63
V.4.6- Vérification	64
V.4.7- Schéma de ferrailage de la dalle machine.....	66

Chapitre VI : Etude dynamique

VI.1- Introduction	67
VI.2- Objectif de l'étude dynamique.....	67
VI.3- Présentation de logiciel l'ETABS	67
VI.4- Modélisation	68
VI.5- Etude sismique	71
VI.6- Méthode dynamique modale spectrale	72
VI.7- Calcul de la force sismique par la méthode statique équivalente	75
VI.8- Résultante des forces sismiques de calcul	76
VI.9- Résultats de l'analyse dynamique du modèle	77
VI.9.1- Caractéristiques dynamiques propres du model.	78
VI.9.2- Calcul du centre de gravité des masses et centre de rigidité.....	80
VI.9.3- Calcul et vérification des déplacements des planchers.....	82
VI.9.4- Justification vis-à-vis de l'effet P- Δ	83
VI.9.5- Vérification au renversement	84

Chapitre VII : Ferrailage des voiles

VII.1- Introduction	85
VII.2- Ferrailage des voiles	86
VII.2.1- Prescriptions imposées le RPA99	86
VII.2.2- Méthode de calcul	87
VII.2.3- Exposé de la méthode	87
VII.3- Vérification	91
VII.4- Exemple de calcul	92
VII.5- Vérification des contraintes de cisaillement	94

Chapitre VIII : Etude de l'infrastructure

VIII.1- Introduction	115
VIII.2- Caractéristiques mécanique du sol	115
VIII.3- Choix de type de fondation	115
VIII.4- Classification des fondations	116
VIII.5- Semelles filantes	117
VIII.6- Radier général	118
VIII.7- Calcul des nervures	119
VIII.8- vérification de la stabilité du radier	121
VIII.9- calcul des contraintes	123
VIII.10- Ferrailage du radier	124
VIII.11- Vérifications nécessaires	125
VIII.12- Ferrailage du Nervure 55×70	126
VIII.13- Ferrailage du débordement	128
VIII.14- Voile périphérique	128

Conclusion final	132
-------------------------------	-----

Annexe

ملخص

الهدف من هذا المشروع دراسة هيكل بالخرسانة المسلحة يتكون من طابق تحت الأرضي، طابق ارضي بالإضافة إلى تسعة طوابق للاستخدام (السكني والتجاري). المبنى واقع في بلدية بوسماعيل حي شعبية ولاية تيبازة الذي ينتمي إلى منطقة زلزالية قوية (المنطقة الثالثة) وهي عبارة عن هيكل مدعوم بنظام الجدران الداعمة (الساندة) مع تقنية صدقة الأنفاق صمم وفقا للمعايير المعمول بها في الجزائر سنة 99 نسخة معدلة سنة 2003، وقوانين الخرسانة المسلحة في الحالات المحددة 91 كما تم إجراء الدراسة الديناميكية و حساب الجدران باستخدام برنامج ETABS، أما في يخص البنية التحتية فقد أدت إلى دراسة أساس عام بسبب أهمية الأحمال المنقولة إلى السطح

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المسلحة، المبنى، الجدران الداعمة، صدقة الأنفاق، ديناميك، ETABS، أساس عام.

Résumé

L'objectif de ce travail étude d'une structure en béton armé, constituée d'un Rez de chaussé plus neuf étages, a usage multiple (habitation et commercial) Le bâtiment situé à la commune de BOUSMAIL, Cité CHAIBA , wilaya de TIPAZA qui fait partie de la zone de forte sismicité (Zone III). C'est une structure contreventée par un système voiles porteur avec la technique de coffrage tunnel, Conçu selon les Règles Parasismiques Algériennes (RPA99 version 2003) et les codes du béton armé , (BAEL 91).

L'étude dynamique et le calcul des voiles a été réalisée à l'aide du logiciel ETABS v9.7.4, En ce qui concerne l'infrastructure du bâtiment, elle a abouti à une fondation de type Radier général suite à l'importance des charges transmises au sol d'assise

Mots-clés : Béton armé, Bâtiment, Voile porteur, Coffrage tunnel, Dynamique, ETABS, Radier général

Abstract

this work aims to study a reinforced concrete structure, consisting of a ground floor plus nine floors, for multiple use (residential and commercial) The building located in the town of BOUSMAIL, Cité CHAIBA, wilaya of TIPAZA which is part of the zone of strong seismicity (Zone III). It is a structure braced by a load-bearing wall system with tunnel formwork technique, Designed according to Algerian Earthquake Rules (RPA99 version 2003) and reinforced concrete codes (BAEL 91).

The dynamic study and calculation of the sails was carried out using ETABS v9.7.4 software, Regarding the building infrastructure, it resulted in a general raft foundation due to the importance of the loads transmitted to the base

Keywords : Reinforced concrete, Building, Load-bearing wall, Tunnel formwork, Dynamics, ETABS, General slab

LES PLANS D'ARCHITECTURES

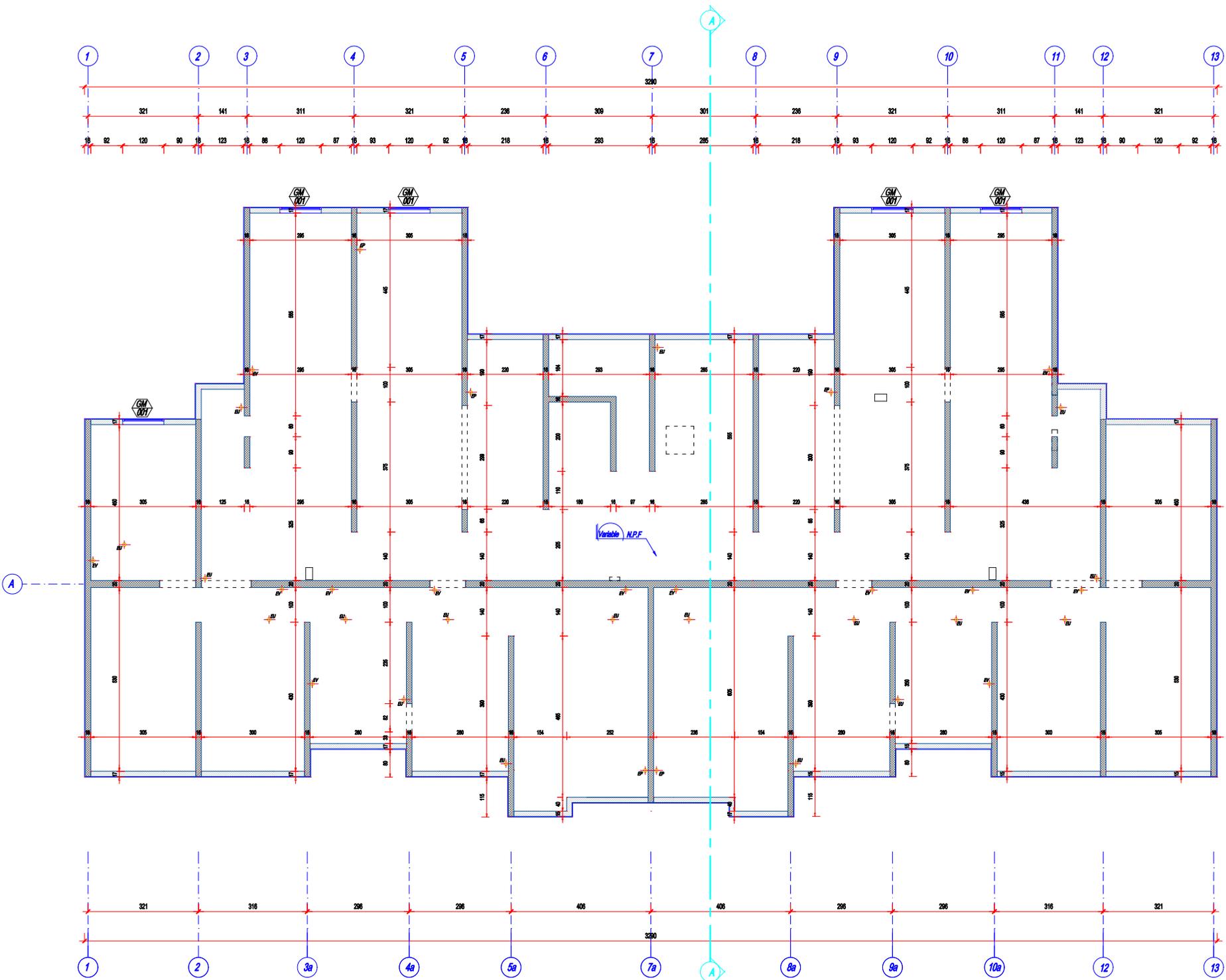




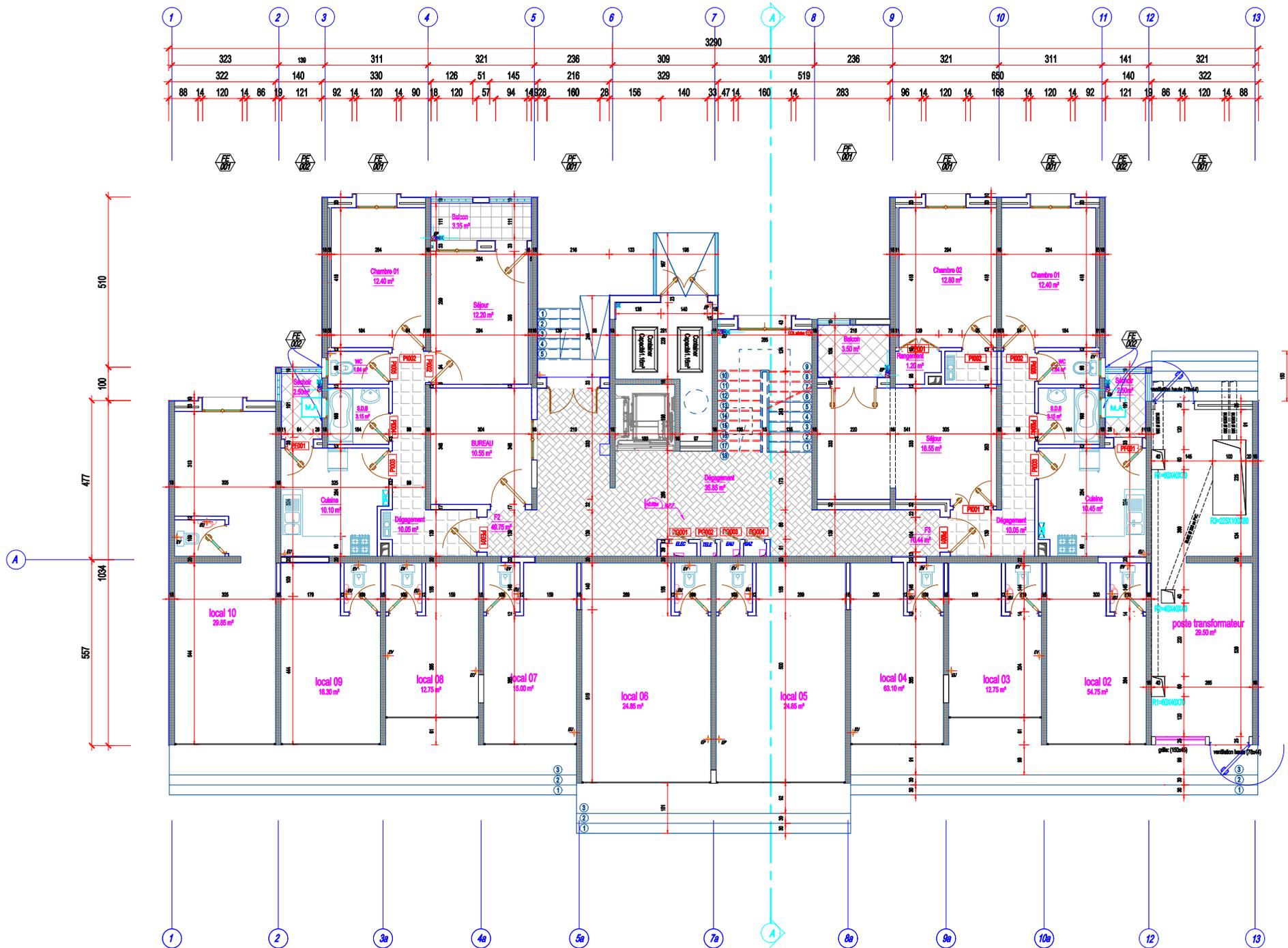
Façade postérieure



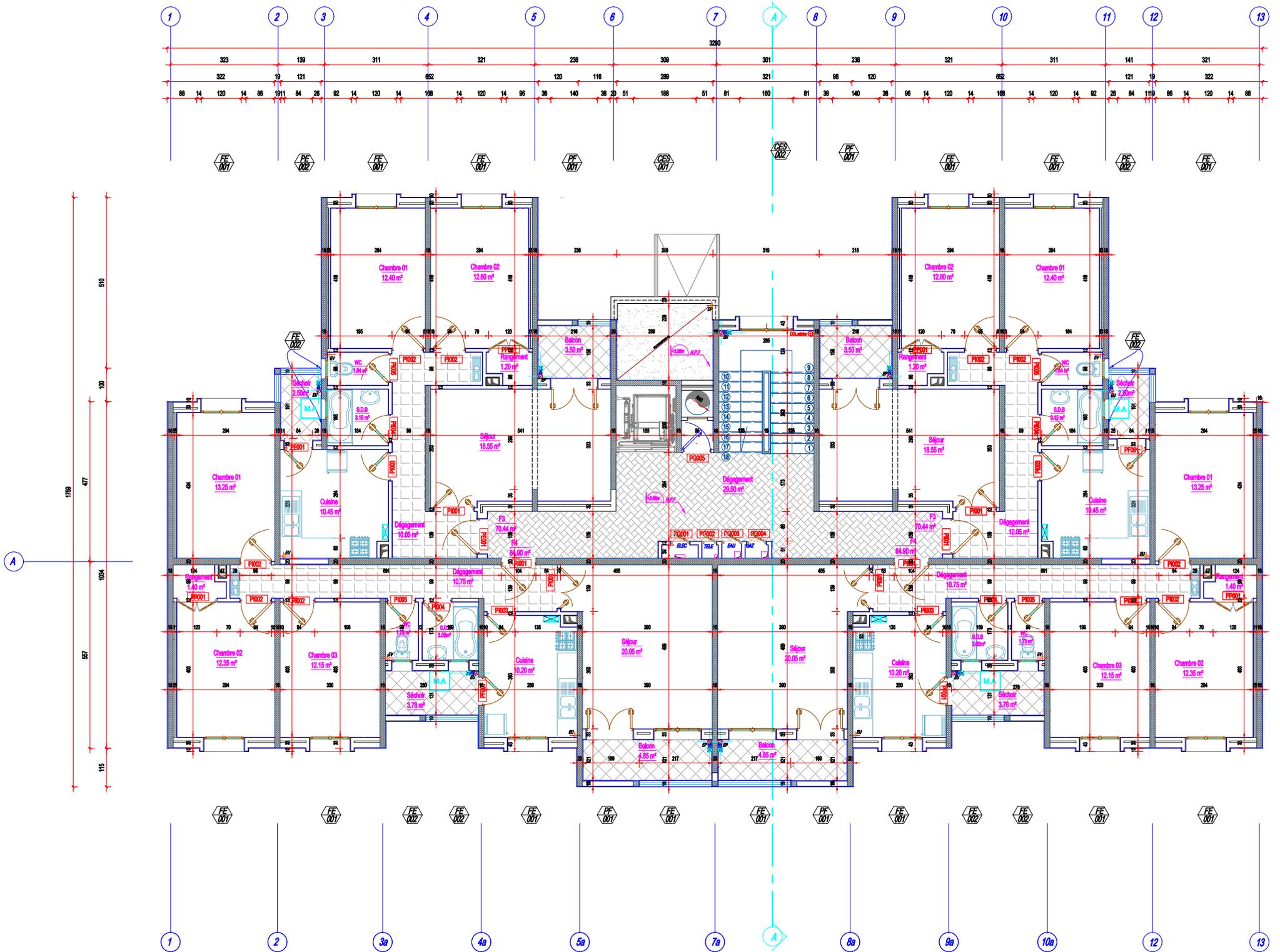
Façade principale

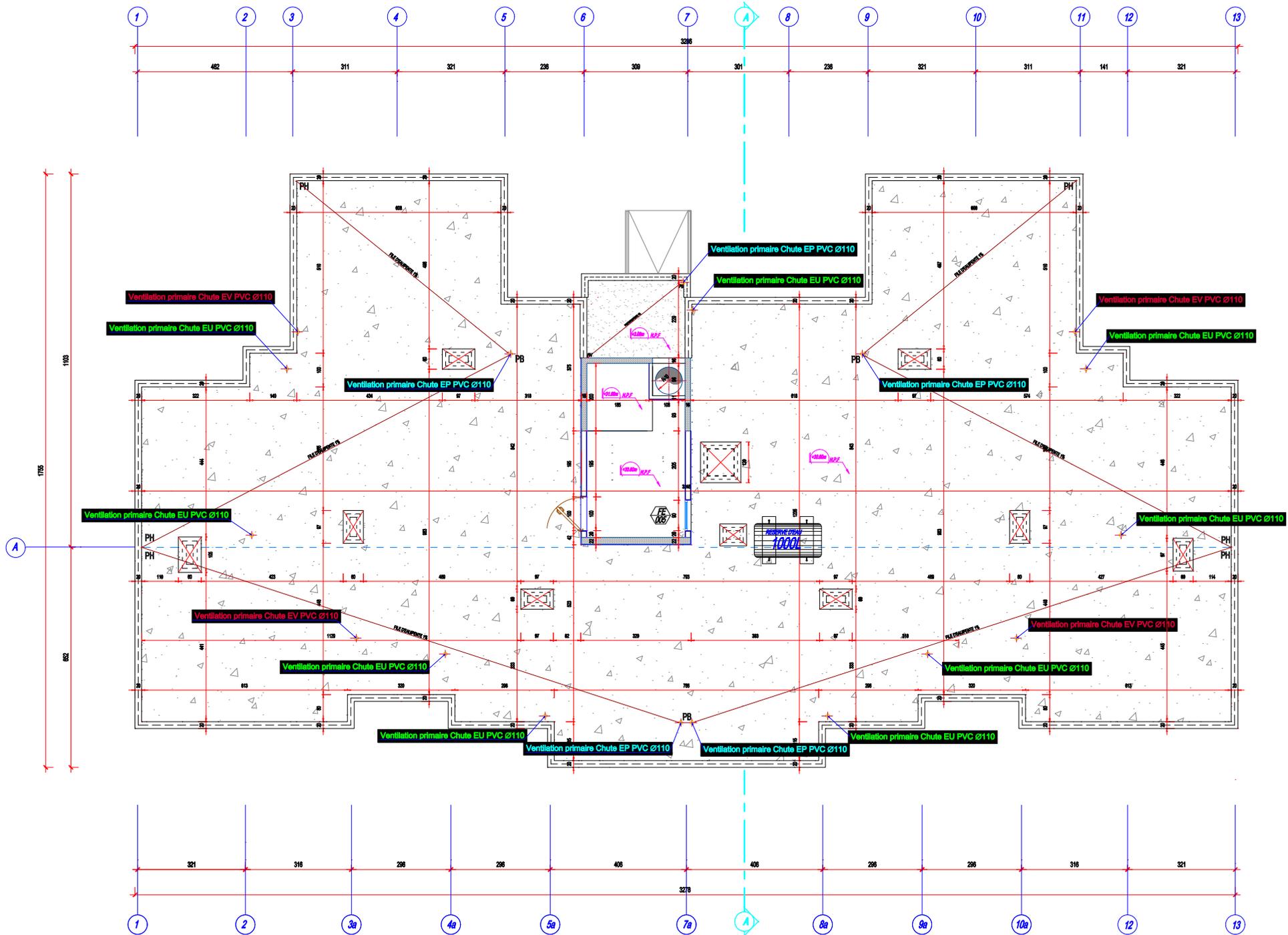


Vue en plan sous sol

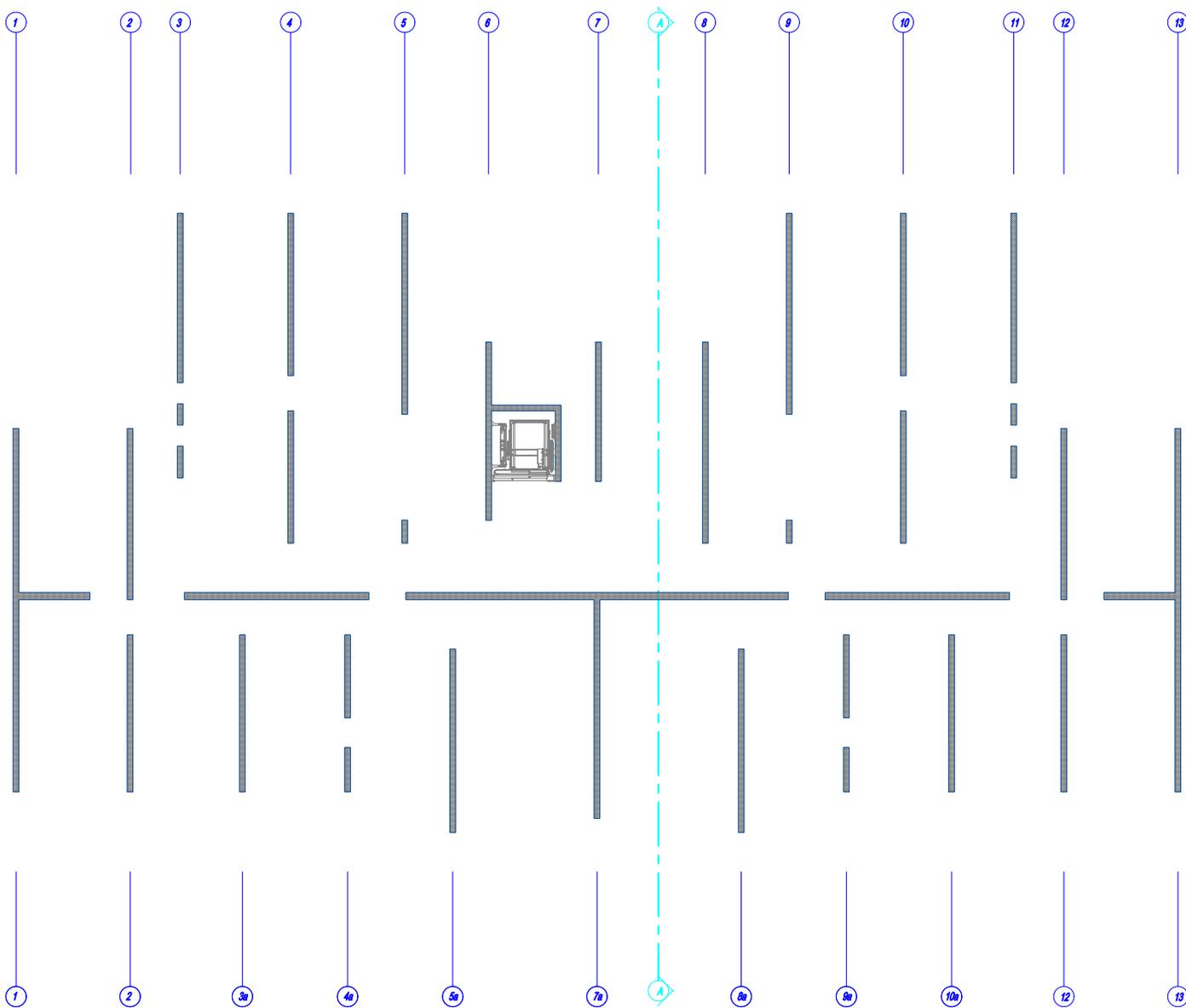


Vue en plan rez de chaussé





Vue en plan plancher terrasse



Disposition des voiles

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie est parmi les pays qui sont soumises à de grande activités et risques sismiques. Les Récents tremblements de terre qui ont secoué l'Algérie (partie nord) au cours de ces trois dernières décennies, ont causé d'énormes pertes humaines et des dégâts matériels importants.

Pour mieux se protéger contre d'éventuels mouvements sismiques, il est nécessaire de bien comprendre le phénomène des tremblements de terre qui est à l'origine de mouvements forts du sol.

Les ingénieurs en génie civil sont appelés à concevoir des structures dotées d'une bonne rigidité et d'une résistance suffisante vis-à-vis de l'effet sismique, tout en tenant compte des aspects structuraux, fonctionnels, économiques, esthétiques et la durabilité de l'ouvrage.

Toute fois le choix du système de contreventement dépend de certaines considérations à savoir la hauteur du bâtiment, la capacité portante du sol et les contraintes architecturales.

Le projet qui nous a été confié porte sur l'étude d'un bâtiment usage habitations en R+9+SSOL, il est contreventé par des voiles porteurs, technique coffrage tunnel .

L'étude de ce bâtiment, se fait tout en respectant les réglementations et recommandations en vigueur à savoir (RPA99/2003,BAEL91/99 et CBA93) et les documents techniques y afférant (D.T.R. BC2.2).

Pour procéder à une bonne étude du projet, la reconnaissance du sol est indispensable, et cela par le biais des essais de laboratoire, ainsi que des essais in situ. On se base sur le plan de travail suivant :

- Le premier chapitre pour généralites sur le système de coffrage tunnel
- Le deuxième chapitre, qui est Présentation de l'ouvrage .
- Le troisième chapitre, pour le pré dimensionnement des éléments structuraux et descent des charger.
- Le quatrième chapitre, pour l'étude des plancher.
- Le cinquième chapitre, pour l'étude des éléments non structuraux .
- Le sixième chapitre, pour l'étude dynamique.
- Le septième chapitre pour l'étude des voiles
- Le dernier chapitre, pour l'étude de l'infrastructure.

Et on termine par une conclusion générale qui synthétise notre travail

Chapitre I



Généralité sur le coffrage tunnel

Généralités sur le système de coffrage tunnel

I.1- Introduction

Historiquement le coffrage a connu une évolution très importante. Il est apparu sous sa forme la plus traditionnelle dès que le béton armé a été utilisé dans la construction. Il fallait en effet pouvoir couler le béton dans un ouvrage temporaire susceptible de lui donner forme tout en assurant sa stabilité et conçu de manière à demeurer indéformable jusqu'au moment du décoffrage. Les conditions de production ont changé fondamentalement au cours des années sous la pression du cout croissant de la main-d'œuvre, des exigences de rentabilité mais aussi de sécurité sur le chantier incitant les fabricants à produire de nouveaux matériaux et à investir dans la conception et la fabrication de matériels performants et faciles à mettre en œuvre.

Le coffrage tunnel est l'un des types de coffrage qui sera utilisé dans notre projet. Qu'est ce qu'un coffrage tunnel ?

C'est ce que nous aborderons dans ce chapitre.

I.2- Le coffrage tunnel

I.2.1- Description

Les coffrages tunnels sont des moules métalliques, Ils sont constitués essentiellement de deux panneaux verticaux reliés à leur partie supérieure par un panneau horizontal. Ils peuvent être monoblocs ou composés de deux demi-coquilles que l'on assemble rigidement entre elles par verrouillage au moment du réglage et du bétonnage. La stabilité de chaque demi-coquille prise séparément est assurée par une béquille articulée.

I.2.2- Fonctionnement

Le système de coffrage tunnel est un système de coffrage en acier assurant le coulage relié au fondement de coulage quotidienne avec le béton voile et le béton de plancher dans les bâtiments (**Figure I.1**). Grâce à ce système, les mains d'œuvre se réduisent et la durée de construction est beaucoup plus courte et économique par rapport aux constructions avec les méthodes conventionnelles. Le système de coffrage du tunnel assure une grande économie dans les travaux fins et les travaux d'installation des bâtiments grâce à la qualité, la facilité et la précision dimensionnelle nécessités en construction béton armée. Il permet l'obtention de surface de béton de très haute qualité grâce à sa technologie de surface en acier. Les bâtiments réalisés avec le système de coffrage de tunnel sont les structures en béton armée les plus

résistantes face aux tremblements de terre, diminuant intensivement les risques d'effondrement et réduisant au minimum les erreurs dans la construction.

La plus grande caractéristique du système de coffrage de tunnel est qu'il assure la possibilité de coulage quotidienne de béton et un rendement élevé dans le terrain grâce à la répétition comme un ordre en usine des mêmes travaux chaque jour en transformant la construction de bâtiment en une structure semblable de ligne de production industrielle.



Figure I.1 : Schéma du système coffrage tunnel.

I.2.3- La taille standard du tunnel (source internet)

- Hauteur : 2.30-3.00 m.
- Longueur : 0.0625-1.25-2.50 m.
- Largeur : 1.05-1.35-1.65-1.95-2.25-2.55-2.85-3.10 m.

Selon la capacité de la grue, ces éléments peuvent être combinés jusqu'à 12.50 m de longueur. Il n'y a pas de limite aux dimensions. Cependant, les dimensions standard devraient être préférées pour réutilisation dans des futurs projets. Les exigences de taille sont remplies par la production de modèles spécifiques.

I.2.4- Réservations pour ouvertures

dans la conception on a prévu la réalisation des ouvertures sur les murs voiles dont le coffrage tunnel donne cette avantage.

Sur un coffrage vertical est élevée poly tunnel compter les portes et fenêtres (comme représentée) Conformément a la carte de montage :

- Par incorporation de précadres métalliques.
- Par coffrage perdu bois
- Par coffrage avec chants en béton de fibre

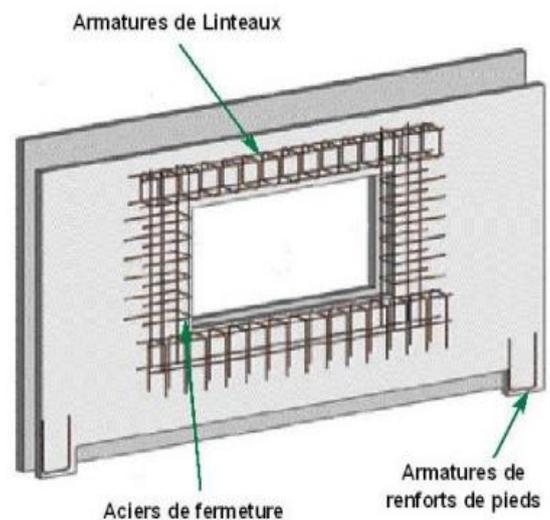
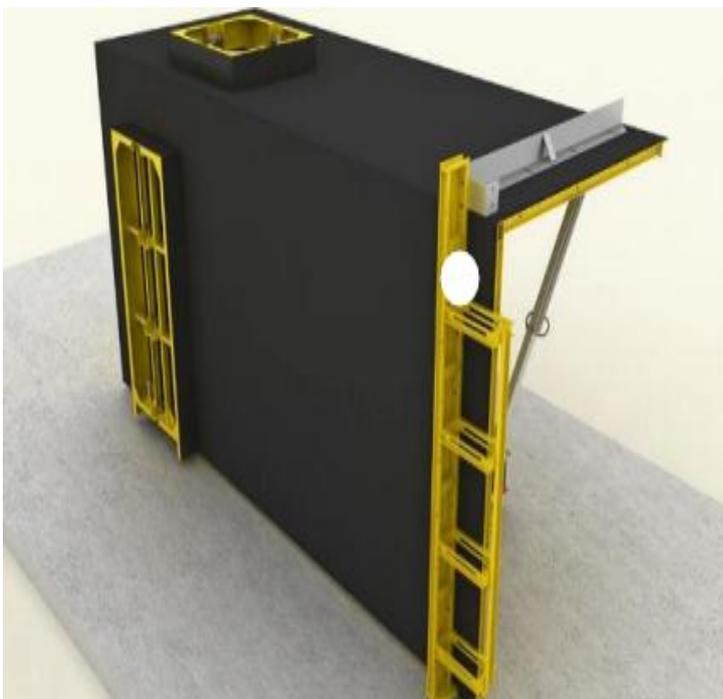


Figure I.2 : réalisation des ouvertures sur un coffrage

I.3- Les accessoires de coffrage tunnel

➤ *Demi-coquille* (Figure I.2)

Le coffrage Tunnel est composé de:

1-2 Des demi-coquilles (un panneau vertical et un panneau horizontal) qui s'assemblent pour constituer un tunnel. **3** Des contrefiches articulées relient panneaux horizontal et vertical. Elles permettent le réglage de la planéité de la dalle et facilitent les opérations de décoffrage. Le panneau vertical est équipé de dispositifs de réglage de translation **4** et d'une triangulation de stabilité avec roulette **5**. Le panneau horizontal peut recevoir des bandes additionnelles **6** permettant une multitude de solutions dimensionnelles, d'où un grand nombre de réemplois

sur des opérations différentes. Un panneau de fond **7** peut équiper les demi-coquilles pour couler un mur de contreventement en même temps que les voiles et la dalle. Son originalité est marquée par la disposition horizontale des poutres de panneaux, ceci permet de multiples décalages horizontaux.



Figure I.3 : Assemblage de deux demi-coquille.



Figure I.4 : Ensemble roulette de translation et verin de mise à niveau.



Figure I.5 : Roulette de triangulation et verin de mise à l'aplomb.



Figure I.6 : Contrefiche articulée facilitant le décoffrage.



Figure I.7 : Bande additionnelle.



Figure I.8 : Coffrage d'amorce du voile supérieur.

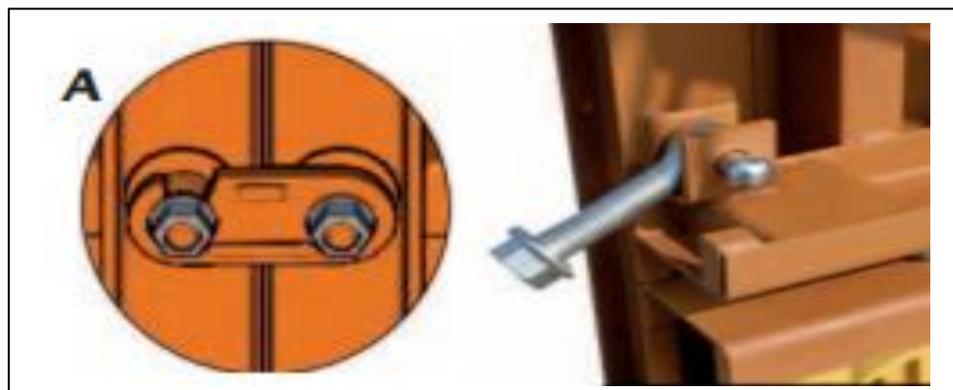


Figure I.9 : Tige de liaison entre panneaux.

Les panneaux horizontaux sont reliés entre eux par des verrous de clés pour former un tunnel complet. La liaison des tunnels entre eux se fait par des tiges à œil (**Figure I.9**)

Coffrage d'amorce pour positionner le voile supérieur avec précision, le coffrage d'amorce est mis en place sur les demi-coquilles avant bétonnage (**Figure I.8**). L'amorce est réalisée en même temps que la dalle.

➤ ***Les rives de dalles et abouts de voile***

Les rives de dalles et abouts de voile sont ajustés à la longueur des voiles et des dalles. Ils sont solidaires du coffrage pendant toutes les manutentions (**Figure I.10**)

➤ ***Cadre de réservation***

A chaque rotation, des cadres pour portes, fenêtres, trémies sont mis en place. Le positionnement et la fixation de ces réservations sont repérés sur les coffrages. (Figure I.11)



Figure I.10 : Abouts de voile.



Figure I.11 : Cadre de réservation.

- *Passerelle de décoffrage*

L'utilisation du coffrage tunnel exige tout autour du chantier un ensemble de passerelles de décoffrage ou de service. De la profondeur d'au moins d'une demi coquille, elles sont installées en bordure de façade par des grues, leurs fonctions principale est de dégager les demi-coquilles après décoffrage, de soutenir les dalles prématurément décoffré (de l'ordre de 4 à 5 jour) tout en assurent la sécurité du personnel.

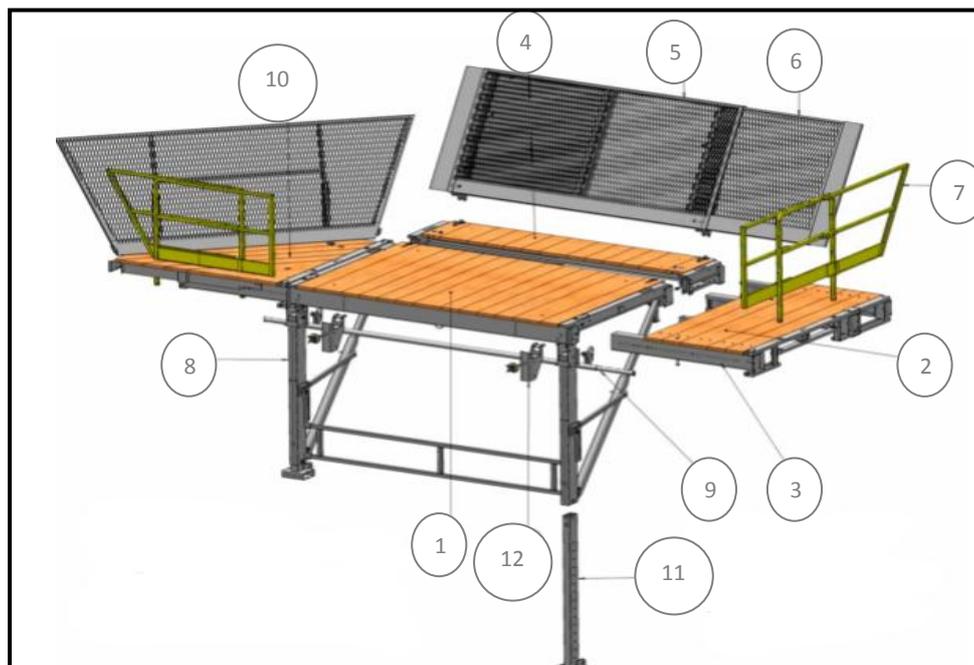


Figure I.12 : Schéma de passerelle de décoffrage

1. Plateforme de travail ;
2. Extension longitudinale ;
3. Rallonge d'ossature ;
4. Extension arrière de platelage ;
5. Protection longitudinale en auvent ;
6. Extension de protection longitudinale ;
7. Protection d'extrémité ;
8. Montant ;
9. Dispositif de verrouillage ;
10. Extension d'angle ;
11. Extension de montant ;
12. Support.

➤ *Espaceurs de coffrage*

- Les Cônes d'entretoise

Ces espaceurs récupérables ont deux fonctions, ils maintiennent l'espacement de coffrage et servent de passage pour tout type de tige filetée.



Figure I.13 : Cônes d'entretoise.

- Les talonnettes de banches

Ces talonnettes a pour positionner les banches . Se cloue sur le plancher, permettent de maintenir et caler le coffrage. Fabriquée entièrement en plastique. Très rigide et très solide.



Figure I.14 : Les talonnettes de banches

➤ *Les écarteurs de coffrage*

Les écarteurs permettent de garantir le respect de l'enrobage des armatures dans un élément en béton armé, que ce soit pendant le ferrailage, le coffrage ou le bétonnage.

En effet, lors de l'élaboration d'un ouvrage en béton, on demande une position précise des armatures:

- Les écarteurs de nappes d'armature ($L = 2\text{ m}$):

Chaise ZigZag continue garantissant l'écartement entre deux treillis d'armatures horizontaux (dalle) ou verticaux (voile).

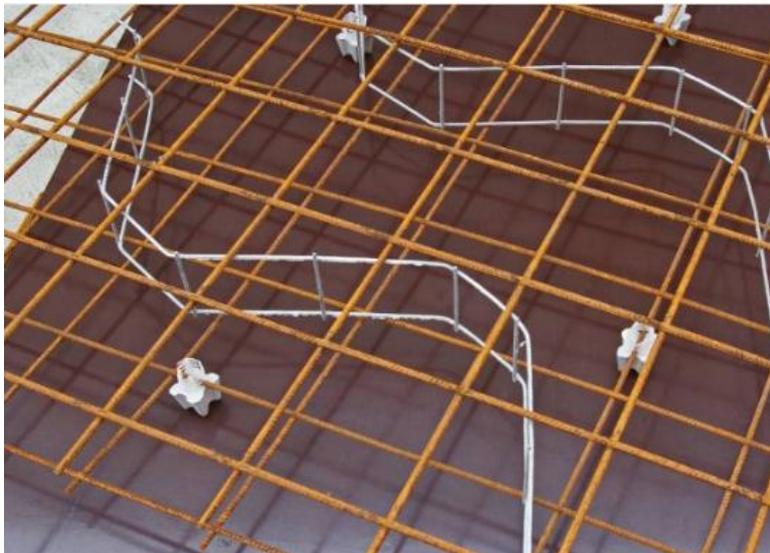


Figure I.15 : Les écarteurs de nappes d'armature.

- Ecarteurs pour armatures verticales :

Ecarteur ponctuel garantissant l'enrobage et l'entre distance des armatures placées verticalement.

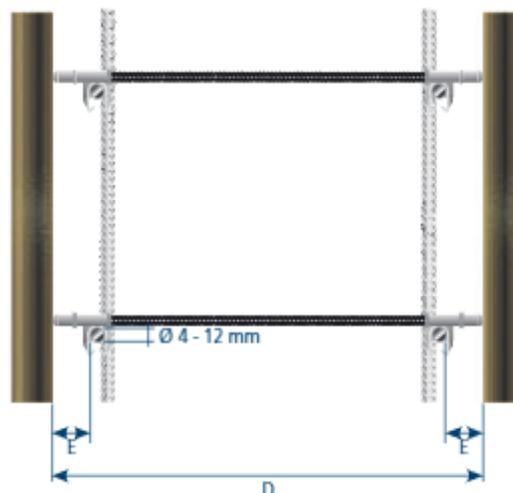


Figure I.16 : Ecarteurs pour armatures verticales.

➤ *Les sabots de coffrage*

Ils servent à maintenir les planches de coffrage lors du coulage d'une dalle en béton



Figure I.17 : Les sabots de coffrage.

➤ *Les tiges de coffrage*

Elles traversent les banches, la longueur standard de la tige de coffrage filetée est de 6 ml, Elles sont utilisées pour resserrer le coffrage à l'aide d'écrous, de platines d'appui et de clés de coffrage.



Figure I.18 : Les tiges de coffrage.

➤ *Les aimants de mannequin*

Ils servent à fixer les mannequins de portes et fenêtres ou autres éléments métalliques du coffrage



Figure I.19 : Les aimants de mannequin.

I.4- Etapes d'exécutions

Dans cette partie en va faire l'analyse étape par étape afin de mieux comprendre les procédés du coffrage tunnel :

- 1^{er} étape

La première étape sert à la mise en œuvre des fondations (radier général) , l'installation de coffrage spécial pour couler les amorces de voiles, appelé aussi talonnettes, elles servent de repère pour aligner les demi coquille sur un même niveau.

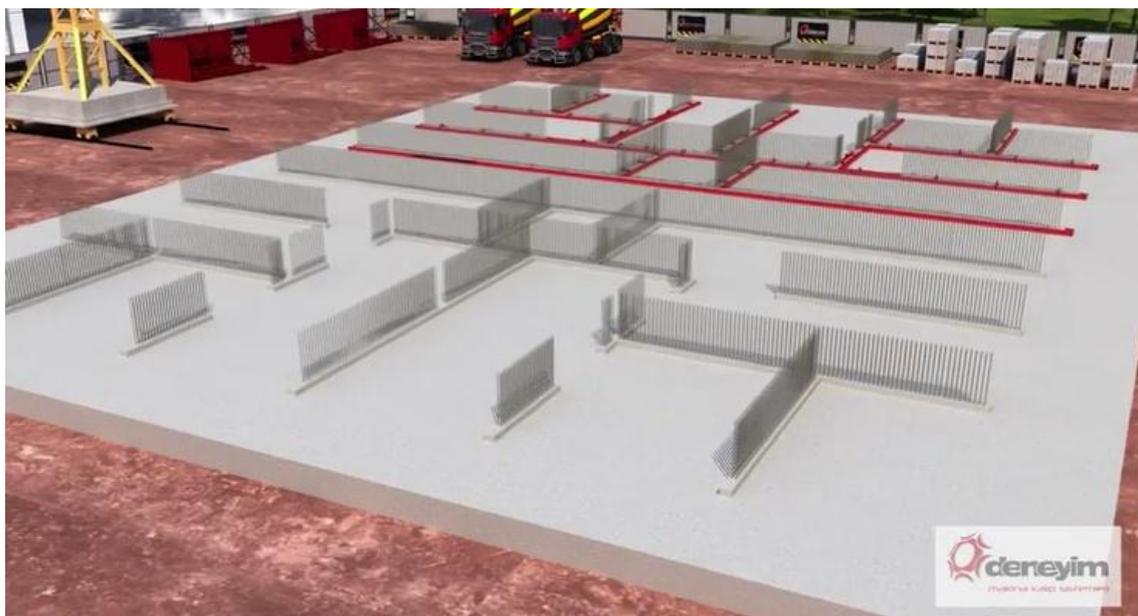


Figure I.120 : Mise en œuvre des fondations (radier général).

- 2^{ème} étape

Après le coulage des talonnettes achevé, commence le ferrailage des voiles (la disposition des treillis soudé ainsi que les différentes armatures de renforcement).

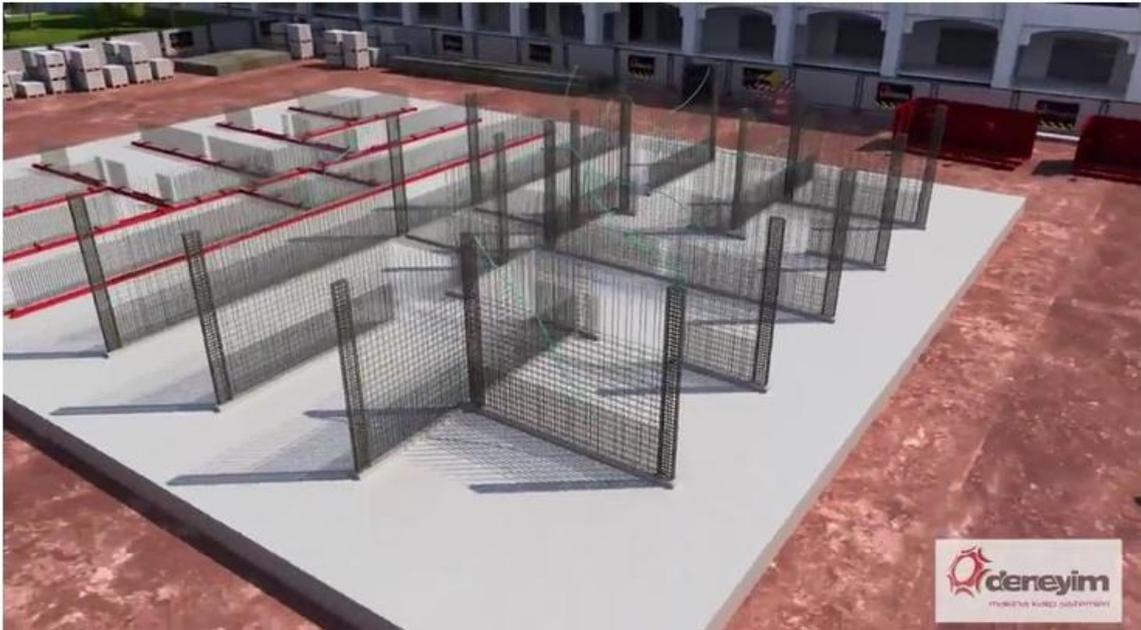


Figure I.21 : Ferrailage des voiles.

Remarque

Les talonnettes seront marquées par un trait appelé « trait de niveau », de telles façons que lors du positionnement des demi-coquilles, leurs bases viennent s'y affleurer pour obtenir un niveau unique pour tous les coffrages

- 3^{ème} étape

La mise en place des demi-coquilles face à face sur toute la longueur de la surface à construire et constituer des chambres de coffrage , cette opération délicate nécessite l'emploi de grue, mobile ou fixe, et demande patience, précision ainsi qu'une bonne coordination entre le grutier et le chef de groupe.



Figure I.22 : La mise en place des demi-coquilles.

Mise en place des divers réserves (porte, fenêtre, équipement électriques) sur les parois verticales qui seront soit découper dans les murs, soit noyer sur son épaisseur. Disposition des connes d'entretoise sur les parois verticales, elles sont faites en plastique et permettent de protéger les tiges de solidarisation de deux demi-coquilles opposées (dos à dos) lors du coulage de béton.



Figure I.23 : Mise en place des divers réserves.

- **4^{ème} étape**

Après le positionnement du demi-coquille face à face, le réglage du niveau de la chambre jouent sur le dévissage du vérin à vice en bas du coffrage tout en respectant les traits de niveau

Réglage de l'horizontalité et la verticalité des demis coquilles pour pouvoir les biens solidariser

- **5^{ème} étape**

En verrouillant les crochets métallique et en les bloquant à l'aide de boulons conique pour solidariser les deux demi coquilles

Derniers réglages du niveau, de la verticalité et de l'horizontalité d'une chambre.



Figure I.24 : Solidariser les deux demi coquilles.

- **6^{ème} étape**

Mise en place de la 3^{ème} demi coquille au dos de la 1^{ère} demi coquille.

Régalage de la 3^{ème} demi-coquille au même niveau que le 1^{ère} et les solidariser à l'aide d'entretoises ou de tirants avec écrous spéciale



Figure I.25 : Mise en place de la 3^{ème} demi coquille.

Les mêmes étapes précédentes se répètent pour toutes les autres demi coquilles.

- **7^{ème} étape**

Mise en place des bandes pignon.

Mise en place du ferrailage des dalles au-dessus des chambres de coffrage et prévoir d'éventuelles réservations (tuyau d'évacuation, cage d'ascenseur, équipement électriques).

Coulage du béton de plancher et des voiles en même temps. Il est impératif de bien vibrer le béton coulé et de descendre le vibreur jusqu'à la base des voiles en cours de coulage.

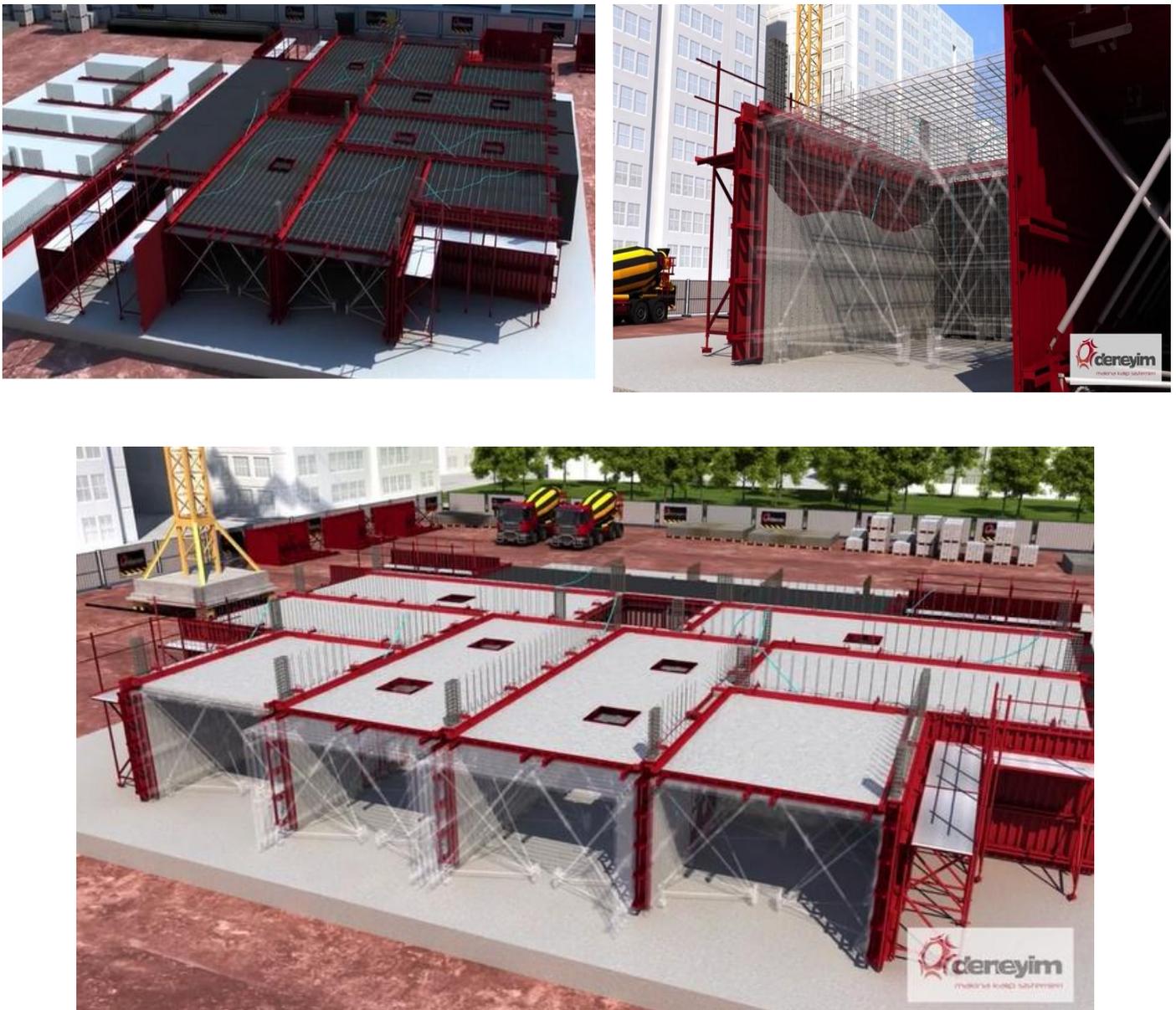


Figure I.26 : Mise en place du ferrailage des dalles et Coulage du béton de plancher et des voiles.

- **8ème étape**

Une fois la prise et le durcissement du béton atteint, le décoffrage peut commencer en utilisant le triangle de levage lié par des câbles a une grue.



Figure I.27 : Le décoffrage.

Remarque

Après le décoffrage des voiles et des dalles, nous passerons au second niveau, mais avant cela nous devons penser à étailler les dalle prématurément décoffré (4 à 5 jours) pour permettre aux ouvriers de procéder au ferrailage des voiles du second niveau , par conséquent la mise en place des passerelles de sécurité est indispensable pour la suite des travaux.

Les passerelles seront donc introduites sur les chambres (couler) du 1er niveau, la suite des travaux sera une réitération des étapes précédentes.



Figure I.28 : La mise en place des passerelles de sécurité.



Quelques exemple de la mise en oeuvre de la technique de coffrage tunnel sur chantier





Figure I.29 : Exemple des bâtiments réalisés en coffrage tunnel.

I.5- Domaine d'application

- Le coffrage tunnel convient bien pour exécuter des bâtiments très répétitifs, notamment si ce sont des bâtiments en bande à refends porteurs, généralement à usage d'habitation.
- Il convient aussi pour réaliser des tours, mais l'organisation du chantier est plus difficile.

I.6- Les avantages et les inconvénients du coffrage tunnel

➤ *Avantage*

- C'est un système qui permet de réduire les délais de réalisation en offrant une vitesse d'exécution assez rapide.
- Il offre une qualité de mise en œuvre selon les règles de l'art.
- Il permet d'obtenir des structures plus adaptées aux séismes
- Facilité de reproduction et d'exécution des structures répétitives d'un même projet.
- Il garantit la sécurité des ouvriers par l'emploi de passerelles et filets de sécurité.

➤ *Inconvénients*

- Ce système ne permet pas d'avoir de grand espace habitable au niveau de chaque logement.
- Il ne permet pas d'effectuer des modifications ou transformations par le propriétaire du logement après la fin des travaux.
- Ce système ne permet pas de changer la disposition des voiles après la conception architecturale.
- Ce système n'offre pas beaucoup de perspective architecturale ou esthétique.
- Le coffrage tunnel demande des moyens matériels considérables et un personnel qualifié et spécialisé.

Chapitre II



Présentation de l'ouvrage

Présentation de l'ouvrage

II.1- Introduction

L'objet de notre projet est l'étude d'un bâtiment à usage d'habitation et commercial constituée d'un réez-de chaussée et huit étages plus un sous sol (R+9) sera implanté à la wilaya de TIPAZA commune de BOUSMAAIL

Dans le présent chapitre, on présente une description général de notre projet puis on expose les différents caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilises.

II.2- Caractéristiques géométriques de la structure

- *Dimension en plans :*

- Longueur totaleL = 32.90m.
- Largeur totale.....L = 17.59m

- *Dimension en élévation :*

- Hauteur totale de bâtiment H = 33.66m
- Hauteur de sous-sol h=3.06 m
- Hauteur du rez-de-chaussée : h=3,06 m
- Hauteur de l'étage couranth= 3.06 m

II.3- Données du site

- Le bâtiment est implanté dans une zone classée par les règles parasismiques Algériennes 99/version 2003 comme zone de forte sismicité (zone III)

L'ouvrage appartient au groupe d'usage 2

- Le site est considéré comme site meuble (S3)
- Contrainte admissible du sol $\sigma_{sol} = 2,00$ bars.

II.4- Conception de la structure :

II.4.1- Revêtement

- En carrelage pour les planchers courant.
- En mortier de ciment pour les murs extérieurs, murs des salles d'eau et cage d'escalier.
- En plâtre pour les plafonds et les murs intérieurs.

II.4.2- Les planchers

Les planchers sont considérés comme des diaphragmes rigides d'épaisseur relativement faible par rapport aux autres dimensions de la structure.

Notre bâtiment comporte uniquement des planchers à dalle pleine

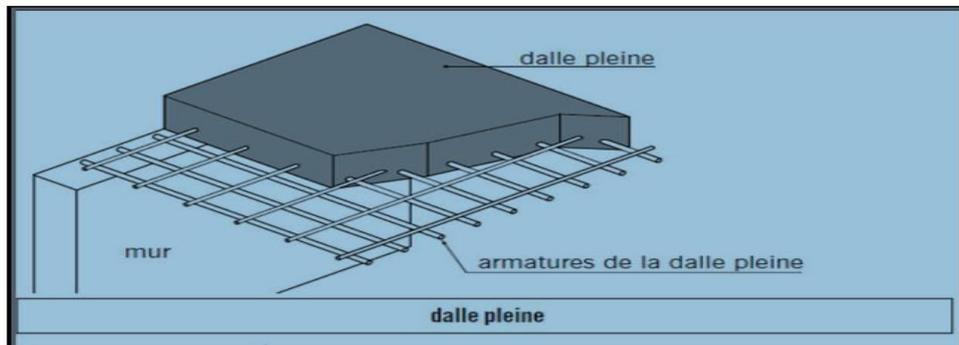


Figure II -1 : Schéma du plancher.

II.4.3- Les escaliers

La cage d'escalier permet l'accès du niveau RDC au neuf étages. Elle est constituée à chaque niveau de deux volées et d'un palier intermédiaire

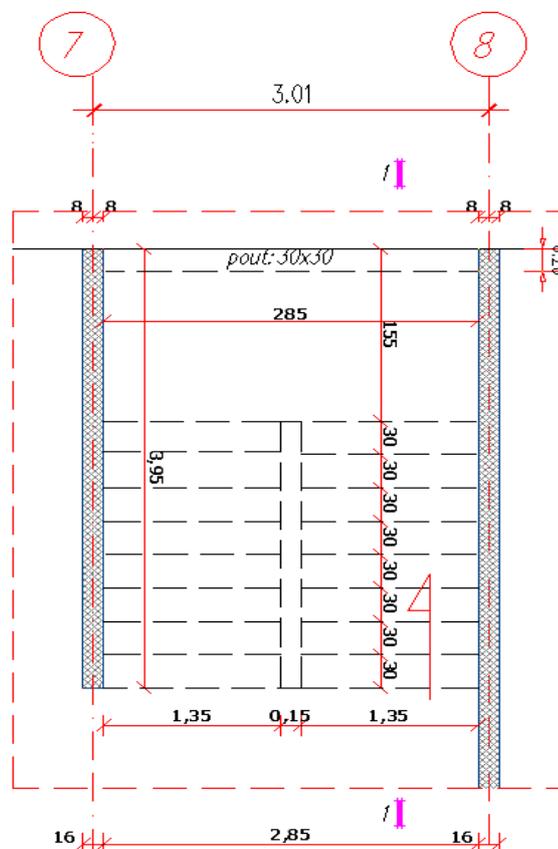
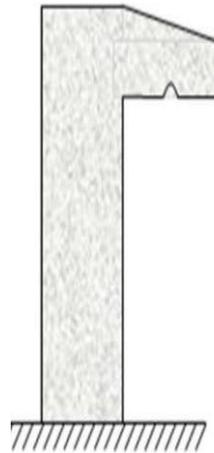


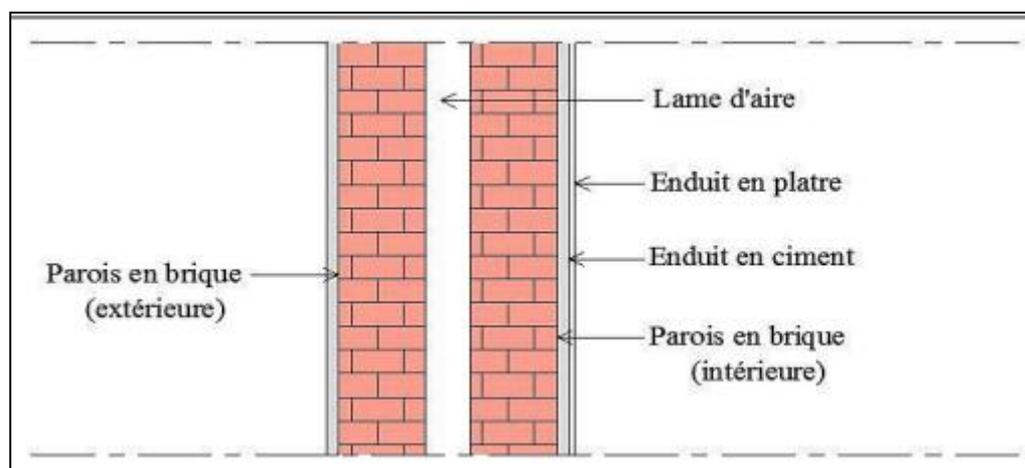
Figure II -2 : Vue en plan des escaliers

II.4.5- L'acrotère :

- Le rôle de l'acrotère est de protéger les joints d'étanchéité.
- Dans notre bâtiment, la terrasse étant inaccessible, donc on adoptera pour l'acrotère les dimensions indiquées sur la figure ci-dessous :

**Figure .II.5:** l'acrotère**II.4.6- Façades :**

Les façades sont réalisées en double cloison par des éléments de briques comportant des ouvertures pour fenêtres à certains endroits.

**Figure .II.6:** Coupe transversale d'un mur de façade

II.5- Caractéristiques mécanique des matériaux :

II.5.1- Le Béton :

Le béton comme les roches naturelles, est un assemblage de matériaux de nature généralement minérale. Il met en présence des matières inertes, appelées granulats ou agrégats (graviers, sables, etc.), et un liant (ciment, bitume, argile), c'est-à-dire une matière susceptible d'en agglomérer d'autres ainsi que des adjuvants qui modifient les propriétés physiques et chimiques du mélange. Mêlés à de l'eau, on obtient une pâte, à l'homogénéité variable, qui peut, selon le matériau, être moulée en atelier (pierre artificielle), ou coulée sur chantier.

II.5.2- Liant hydraulique :

Un liant hydraulique est un **liant** qui se forme et durcit par réaction chimique avec de l'eau et est aussi capable de le faire sous l'eau, ce que l'on nomme **hydraulicité**. Il est utilisé dans la construction et dans l'industrie routière afin de répartir la pression uniformément sur toute la surface des particules.

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gachée avec de l'eau forme une pâte faisant prise et durcit, et qui après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau .

II.5.3- Les granulats (gravier et sable) :

Issus de roches dures ou meubles qui une fois agglomérés par le ciment constituent le squelette du béton. Ils sont constitués par un ensemble de grains minéraux appelés fines, sables et gravillons suivant leurs dimensions comprises entre 0 et 80 mm.

Les granulats sont caractérisés par leur granulométrie qui consiste à déterminer la distribution des différents diamètres des grains qui composent le granulat et sont classés en fonction de leur dimension : 0/5, 3/8, 5/15, 15/25.

Pour le gravier on obtiendra par calibrage les dimensions suivant : (3/8mm), (8/15mm) et (15/25mm). A noter que la classe des granulats doit être choisie de telle sorte que la dimension du plus gros grain puisse se frayer un passage entre les armatures et les parois du coffrage mais plus importants encore, ils doivent être de bonne qualité et exemptés d'impuretés.

II.5.4- L'eau de gâchage :

La qualité de l'eau de gâchage peut avoir une influence directe sur la prise, le développement des résistances du béton et peut aussi avoir un rôle inverse, si elle n'est pas de qualité en favorisant la corrosion des armatures.

L'eau de gâchage ne doit pas contenir de matière en suspension, de débris végétaux, etc. Elle doit être incolore et inodore, en cas de doute il faut demander une analyse chimique.

II.5.5- Les adjuvants pour bétons :

L'état durci. Selon la norme EN NF 934-2, un adjuvant est incorporé lors du malaxage du béton à un dosage inférieur à 5 % des éléments fins (ciment).

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités (en général moins de 3% du produits de ciment, donc 0.4% du poids du béton) afin d'en améliorer certaines propriétés. Leur efficacité est liée a l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton. les principaux adjuvants utilisé dans notre ouvrage sont :

- **Plastocrete 160** :Plastocret 160 est un plastifiant accélérateur de durcissement pour béton prêt à l'emploi
- **Medafloflow 30** :Le Medafloflow 30 est un super plastifiant haut réducteur d'eau.

II.6- Résistance du béton :

II.6.1- Résistance caractéristique a la compression a 28 jours :

Un béton est défini par une valeur de sa résistance à la compression à l'âge de 28 jours

f_{c28} exprimée en *MPa* (**C.B.A 93, A2.1.1.1**)

La résistance caractéristique à la compression f_{cj} à l'âge de $j \leq 60$ jours, est

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{cj} = \frac{j}{4.76+0.83j} f_{c28} \text{ Pour } f_{c28} \leq 40 \text{ MPa} \\ f_{cj} = \frac{j}{4.76+0.83j} f_{c28} \text{ Pour } f_{c28} \geq 40 \text{ MPa} \end{array} \right.$$

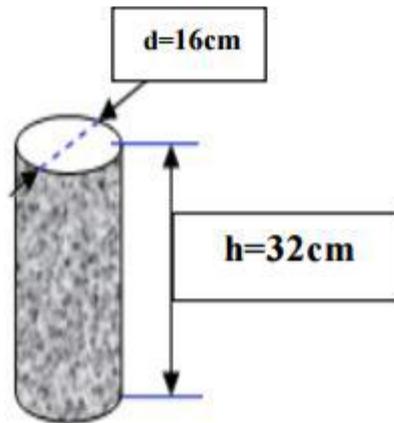


Figure .II.7: Eprouvettes cylindriques
(Diamètre 16 cm, hauteur 32 cm)



Figure .II.8: Ecrasement d'éprouvettes
de béton avec une presse hydraulique

donc nous aurons (avec $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$)

II.6.2- Résistance caractéristique a la traction a j jours :

D'après les regelés du (C.B.A 93 article A2.1.1.2), la valeur conventionnelle notée f_{tj}

(en MPa) par la relation suivante :

Pour $f_{cj} \leq 60 \text{ MPa}$

$$f_{t28} = 0,6 + 0,06 f_{c28}$$

$$f_{t28} = 2,1 \text{ MPa}$$

II.6.3- Module de déformation longitudinale du béton :

- Le module de déformation longitudinale instantanée :

D'après les regelés du (C.B.A 93, A2.1.2), le module de déformation longitudinale instantanée du béton E_{ij} sous des contraintes normales d'une durée d'application inférieure à 24 heures, est donnée par :

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}}$$

Pour : $j = 28$ jours et $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$, on aura donc :

$$E_{i28} = 32164,19 \text{ MPa}$$

II.6.4- Le module de déformation longitudinale différée :

D'après les regelés du (C.B.A 93, A2.1.2), le module de déformation longitudinale différée E_{vj} Pour les déformations différées du béton qui comprennent le retrait et le fluage est donné par la formule :

$$E_{v28} = 3700 \sqrt[3]{f_{c,j}}$$

Pour : $j = 28$ jours et $f_{c28} = 25$ MPa, on aura donc :

$$E_{v28} = 10818,76 \text{ MPa}$$

II.6.5- Contraintes limites de compression :

D'après les regelés du (C.B.A 93, A.4.5.2), la contrainte admissible de compression à l'état limite ultime est donnée par :

$$\sigma_{bc} = 0,85 \times \frac{f_{c28}}{\gamma_b}$$

Avec :

$\gamma_b = 1,5$ pour les cas courants (E.L.U).

$\gamma_b = 1,15$ pour les situations accidentelles

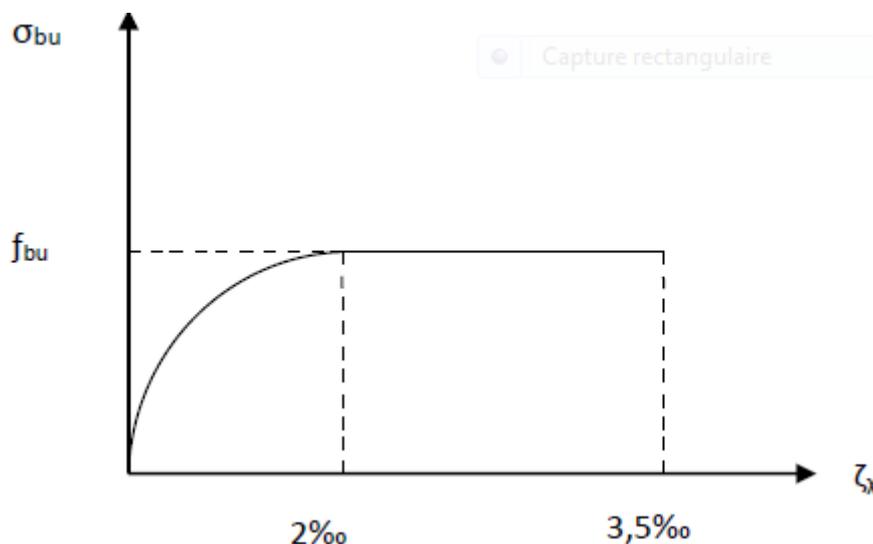


Figure. II.9: Digramme contraintes–déformations du béton à l'ELU.

- La contrainte admissible de compression à l'état limite de service est donnée d'après (C.B.A 93, A.4.5.2) par :

$$\overline{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28}$$

Pour : $f_{c28} = 25$ MPa

$$\overline{\sigma}_{bc} = 15 \text{ MPa}$$

- La contrainte limite de cisaillement (C.B.A 93, A5.1.2.1) :

$$t_u \leq \min(3,3 ; 5) \text{ MPa} \rightarrow t_u = 3,3 \text{ MPa}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t_u \leq \min\left(0,15 \times \frac{f_{c28}}{\gamma_b}, 4\right) \text{ MPa} \rightarrow \text{fouissuration (ou très) préjudiciable} \\ t_u \leq \min(2,5; 5) \text{ MPa} \rightarrow t_u = 3 \text{ MPa} \end{array} \right.$$

II.7- Acier :

II.7.1- la limite d'élasticité garantie f_e :

Les désignations conventionnelles, les nuances et les limites d'élasticité correspondantes sont données par le tableau suivant :

Tableau II.1: Valeurs de la limite d'élasticité garantie f_e

type	Nuance	f_e (Mpa)	Emploi
Ronds lisses	F_eE22 F_eE24	215 235	Emploi courant. épingles de levage des pièces préfabriquées
Barres HA Type 1 et 2	F_eE40 F_eE50	400 500	Emploi courant.
Fils tréfiles HA Type 3	F_eTE40 F_eTE50	400 500	Emploi sous forme de barres droites ou de treillis.
Treillis soudés -lisses -Type 4	TSL TSHA	500 520	emploi courant

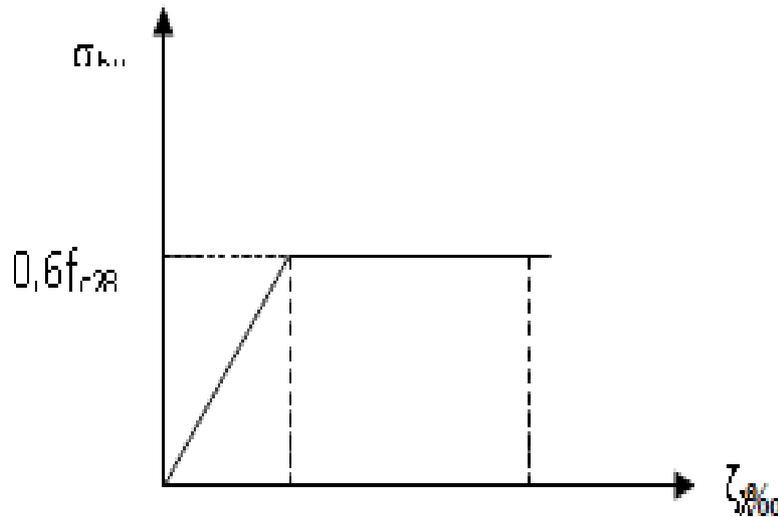


Figure II.10: Digramme contraintes– déformations de l'acier à l'ELS.

Le module d'élasticité longitudinal de l'acier « E_s » est pris égal à :

$$E_s = 2 \times 10^5 \text{ MPa} \quad (\text{C.B.A 93, A2.2.2}).$$

II.7.2- Contraintes limites :

- **Etat limite ultime "ELU" :** (C.B.A 93 A.4.3.2)

$$\bar{\sigma}_s = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ MPa} \quad (\text{situation durables})$$

$$\bar{\sigma}_s = \frac{500}{1} = 500 \text{ MPa} \quad (\text{situation accidentelles})$$

- **Etat limite de service "ELS" :** (C.B.A 93 A.4.5)

C'est l'état où on fait les vérifications des contraintes par rapport aux cas appropriées :

- * Fissuration peu nuisible : pas de vérification.
- * Fissuration préjudiciable: $\bar{\sigma}_s = \min(\frac{2}{3} \times f_e; 110\sqrt{n \times f_{tj}})$
- * Fissuration très préjudiciable : $\bar{\sigma}_s = \min(0,5f_e, 90\sqrt{\eta \times f_{tj}})$

η : Coefficient de fissuration.

$$\begin{cases} \eta = 1 & \text{pour les aciers ronds lisse} \\ \eta = 1,60 & \text{pour les aciers à haute adhérence} \end{cases}$$

II.8- Hypothèses de calcul

Le calcul en béton armé aux états limites ultimes est basé sur les hypothèses suivantes:

- ✓ Les sections droites restent planes après déformations.
- ✓ Il n'y a pas de glissement entre les armatures d'acier et le béton.
- ✓ Le béton tendu est négligé dans le calcul de la résistance à cause de sa faible résistance à la traction.
- ✓ Le raccourcissement unitaire du béton est limité à **3,5 ‰** en flexion simple ou composée et à **2 ‰** dans le cas de la compression simple.
- ✓ L'allongement unitaire dans les aciers est limité à **10 ‰**.
- ✓ La contrainte de calcul, notée « σ_s » et qui est définie par la relation : est égale à :

$$\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s}$$

Chapitre III



Pré-dimensionnement des éléments structuraux

Pré-dimensionnement des éléments structuraux et descente des charges

III.1- Introduction

Dans n'importe quel projet, le pré-dimensionnement est considéré comme étant une étape fondamentale qui consiste à estimer les dimensions des différents éléments structuraux de la construction afin de passer aux calculs,

III.2- Pré-dimensionnement de la dalle

III.2.1- Plancher à dalle pleine

Une dalle pleine est un élément à contour généralement rectangulaire dont les appuis peuvent être continus (poutres, voiles ou murs maçonnés) ou ponctuels (poteaux).

Les dalles pleines sur appuis continus peuvent porter dans deux directions ou bien dans une seule. [1]

Soit : $\alpha = L_x/L_y$

Les portées x et y d'un «panneau» de dalle sont mesurées entre les nus des appuis

Si :

- $0,40 \leq \alpha \leq 1 \Rightarrow$ La dalle est considéré comme portante dans deux directions.
- $\alpha \leq 0,40 \Rightarrow$ La dalle est considéré comme portante uniquement dans le sens de sa petite portée.

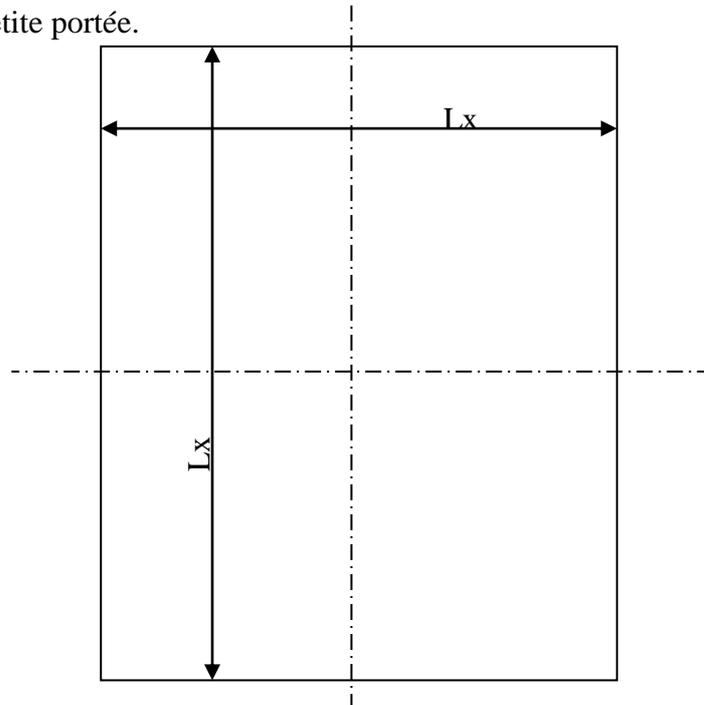


Figure III.1 : Dimensions d'une dalle pleine.

Avec en générale :

L_x : la petite dimension du panneau de dalle

L_y : la grande dimension du panneau de dalle

III.2.2- Calcule l'épaisseur

L'épaisseur des dalles dépend le plus souvent des conditions d'utilisation et de la résistance. On déduira donc l'épaisseur des dalles à partir des conditions ci-après :

On a :

- ✓ pour les dalles reposant sur 2 appuis : $\frac{L_x}{35} \leq e \leq \frac{L_x}{30}$
- ✓ pour les dalles reposant sur 3 ou 4 appui : $\frac{L_x}{50} \leq e \leq \frac{L_x}{40}$

La valeur «e» doit également permettre de satisfaire aux conditions relatives a :

- 1) La résistance à l'incendie,
- 2) L'isolation phonique,
- 3) La sollicitation d'effort tranchant (BAEL A.5.2).

Dans notre bâtiment, on a deux type de planchers, pour le calcul on prend la dalle la plus sollicitée

Donc :

$$\frac{L_x}{35} \leq e \leq \frac{L_x}{30} \Rightarrow \frac{320}{35} \leq e \leq \frac{320}{30} \rightarrow 9,14 \text{ cm} \leq e \leq 10,66 \text{ cm}$$

On prend :

$$e = 10 \text{ cm}$$

➤ **Condition de résistance à l'incendie :**

- $h_d = 7 \text{ cm}$ pour une heure de coupe feu.
- $h_d = 11 \text{ cm}$ pour deux heures de coupe feu.
- $h_d = 17,5 \text{ cm}$ pour quatre heures de coupe feu.

➤ **Condition d'isolation phonique :**

- Contre les bruits ariens : $2500 \times h_d \geq 350 \text{ daN/m}^2 \rightarrow d=14 \text{ cm}$
- Contre les bruits d'impacts : $2500 \times h_d \geq 400 \text{ daN/M}^2 \rightarrow d=15$

Alors l'épaisseur de la dalle pleine sera égale a :

$$e = 15 \text{ cm}$$

III.3- Evaluation des charges

III.3.1- Les charges permanentes

a) Plancher terrasse inaccessible

Tableau III.1 : Charge permanentes du plancher terrasse

Matériaux	E (m)	P.V(kN/m ³)	P.S(kN/m ²)
Protection d'étanchéité au gravillon	0,04	20	0,8
Etanchéité multicouche	0,02	6	0,12
Forme de pente	0,12	22	2,64
Isolation thermique	0,04	4	0,16
Dalle pleine en béton armée	0,15	25	3,75
Enduit de plâtre	0,02	10	0,2

Total G= 7,67kN/m²

b) Plancher étage courant

Tableau III.2 : Charge permanentes du plancher étage courant et RDC

Matériaux	E (m)	P.V(kN/m ³)	P.S(kN/m ²)
Carrelage	0,02	20	0,40
Mortier de pose	0,02	20	0,40
Lit de sable	0,03	18	0,54
Dalle pleine en béton armée	0,15	25	3,75
Enduit en plâtre	0,02	10	0,20
Cloison de distribution	0,10	/	0,10

Total G=5,39kN/m²

III.3.2- Les charges d'exploitations

Surcharges qui varient fréquemment dans le temps, celles-ci sont présentées dans le D.T.R des charges permanentes et surcharges d'exploitations.

Il faut rappeler que notre ouvrage est bâtiment à usage d'habitation.

- ✓ Planchers terrasse (inaccessible) : Q = 1 kN/m
- ✓ Planchers étage courant (niveau 01 → 09) : Q = 1,5 kN/m
- ✓ Plancher RDC : Q = 4 kN/m
- ✓ Sous sol : Q = 1 kN/m

III.3.3- Calcul les sollicitations

Tableau III.3 : les sollicitations à L'ELU et à L'ELS dans les différents
planchers

		G	Q	ELU	ELS
Terrasse		7,67	1	11,8545	8,67
E,Courant		5,39	1,5	9,5265	6,89
RDC	Habitation	5,39	1,5	9,5265	6,89
	commercial	5,39	4	13,2765	9,39
ssol		3,85	1	6,6975	4,85

III.4- Pré-dimensionnement des voiles :

III.4.1- Voile porteur et de contreventement :

D'après le RPA99/2003, c'est un élément porteur rigide en béton- armé destiné à transmettre les charges latérales aux fondations.

Dans le cas de notre structure (constitué uniquement de voiles), il est l'unique élément de transmissions des charges vers les fondations.

Selon l'article 7.7.1 du RPA99/2003, l'épaisseur minimale d'un voile doit être de 15 cm, d'un autre coté elle doit être déterminée en fonction de la hauteur libre d'étage h_e et des conditions de rigidité aux extrémités, soit :

$$* L \geq 4e$$

$$* e \geq \frac{h_e}{20}$$

avec :

- L : largeur du voile correspondant à la portée minimale
- e : épaisseur du voile.
- h_e : hauteur libre d'étage.

$$e \geq \frac{291}{20}$$

$$e \geq 14.55$$

Soit : $e = 15$ cm

III.4.2- Voile périphérique :

C'est un élément d'infrastructure, relie deux niveau, celui des fondations et celui de la structure.

On adoptera : $e = 20$ cm.

Chapitre IV



Calcul des planchers

Etude des planchers

IV.1- Introduction

Une dalle est un élément porteur, généralement horizontal, dont deux dimensions sont grandes par rapport à la troisième que l'on appelle épaisseur. Une dalle peut avoir une forme quelconque, être d'épaisseur variable. Cependant, les dalles les plus courantes sont rectangulaires et d'épaisseur constante.

Dans notre projet, on a deux types de panneaux qu'on va étudier dans ce présent chapitre.

IV.2- Calcul les dalles

IV.2.1- Principe de calcul

Pour le calcul, on utilisera la méthode BAEL, cette méthode s'applique aux dalles rectangulaires en continuité, totalement ou partiellement encastées, soumises à un chargement quelconque, en respectant la règle de fermeture des moments à $1,25 M_0$ dans les deux directions :

$$M_t + \frac{M_w + M_e}{2} \geq 1.25 M_0$$

M_t : Moment en travée

M_w et M_e : valeurs absolues pour les moments d'appui de gauche et de droite.

M_0 : Moment pour une dalle simplement appuyée.

Cette règle permet de simplifier considérablement les calculs en évitant, pour les dalles appartenant à un maillage de rectangle, un calcul bidimensionnel fastidieux de rectangles chargés et déchargés.

En effet, la sécurité à la rupture de la dalle pourra être assurée par une redistribution des moments entre moments sur appuis et moments en travée. La marge de $0,25M_0$ permet de réduire la fissuration qui serait dû à une insuffisance d'acier sur appui ou en travée par rapport à la solution obtenue par un calcul exact (programme aux éléments finis par exemple).

IV.2.2- Hypothèses de calcul

Les dalles sont calculées suivant le rapport ($\alpha = L_x / L_y$), on distingue deux cas :

❶ Dalle travail dans un seul sens

Appelé aussi dalle sur deux appuis, elle porte dans un seul sens, lorsque les deux conditions suivantes sont vérifiées :

- Le rapport $\alpha = L_X/L_Y \leq 0.4$
- La charge est uniformément chargée

✦ Remarque

- Les moments fléchissant sont évalués en prenant en compte la flexion uniquement suivant la petite dimension L_x .
- Le calcul se fait comme pour une poutre de section rectangulaire de largeur ($b = 1\text{m}$) et de hauteur (h_0) et de portée (L_x).
- Les armatures (A_x) calculées sont parallèles à (L_x) et suivant le sens de (L_y), on place des armatures de répartition (A_y).

Pour la détermination des moments fléchissant d'une dalle continue et lorsqu'il s'agit d'un plancher a charge d'exploitation modérée et considéré semi-encasté au niveau des appuis de rive,

on a alors :

❶ Moment en travée :

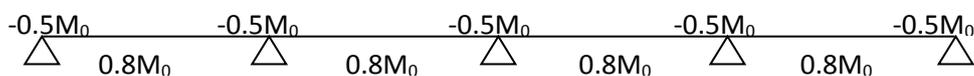
$$M_t = \frac{ql^2}{10} = 0.8M_0$$

❷ Moment en appuis :

$$M_a = \frac{ql^2}{16} = -0.5M_0$$

Avec :

$$M_0 = \frac{ql^2}{8}$$



❷ Dalle travail dans deux sens

Dite dalle sur quatre appuis, elle porte dans deux direction, lorsque les deux conditions sont vérifier :

- Le rapport $0.4 \leq \alpha = L_X/L_Y \leq 1$
- La charge est uniformément chargée

✦ **Remarque**

D'après l'article (A.8.2, 32) du BAEL 91 Modif 99, Les dalles rectangulaires encastrées (totalement ou partiellement) peuvent être calculées à la flexion à partir des efforts qui s'y développeraient si elles étaient articulées sur leur contour.

Les moments de flexion maximaux calculés dans l'hypothèse de l'articulation peuvent être réduits de 15% et 25% selon la condition d'encastrement ce qui conduit à un moment en travée M_t de, respectivement, $0,85M_0$ et $0,75M_0$. Les moments d'encastrement seront dans ces conditions au moins de 40% et 50% des moments maximaux évalués dans l'hypothèse d'articulation.

Dans le cas d'une dalle portant sur deux direction et reposant librement sur son pourtour, les moments fléchissant en travée (M_x et M_y) doivent être affectés d'un coefficient réducteur (noté μ_x et μ_y) déterminé en fonction de (α ; ν):

- Dans le sens de la petite portée : $M_x = \mu_x \cdot q \cdot L_x^2$
- Dans le sens de la grande portée : $M_y = \mu_y M_x$

ν : coefficient de poisson

$\nu = 0,2$ (pour un béton non fissuré à l'ELS)

$\nu = 0$ (pour un béton fissuré à l'ELU).

IV.2.3- Les conditions d'appuis :

Si le panneau de dalle fait partie d'un hourdis continu ou s'il existe un semi encastrement aux appuis, on calculera les moments M_x et M_y par les coefficients suivants :

1- Panneau considéré continu au-delà de ses appuis :

Suivant le sens (x) :

- $M_{tx} = 0,75M_x$ (en travée)
- $M_{ax} = - 0,50M_x$ (en appuis)

Suivant le sens (y) :

- $M_{ty} = 0,75M_y$ (en travée)
- $M_{ay} = - 0,50M_y$ (en appuis)

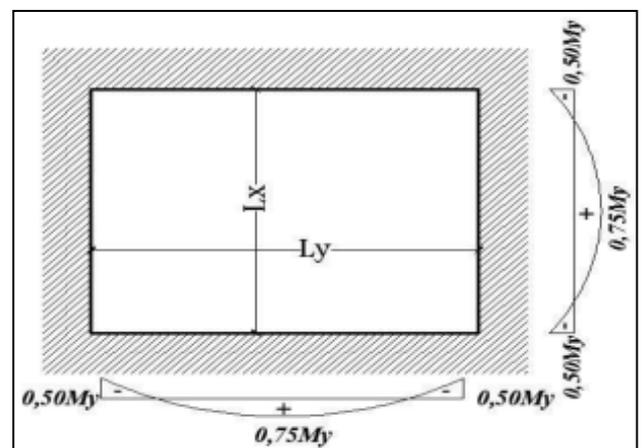


Figure IV.1 : Schéma d'un panneau continu au-delà de ses appuis

2- Panneau de rive dont au moins un appui peut assurer un encastrement partiel :

Suivant le sens (x) :

- $M_{t_x} = 0.85 M_x$ (en travée)
- $M_{a_x} = -0.30 M_x$ (en appuie de rive)
- $M_{a_x} = -0.5 M_x$ (en appuie intermédiaire)

Suivant le sens (y) :

- $M_{t_y} = 0.85 M_y$ (en travée)
- $M_{a_y} = -0.30 M_y$ (en appuie de rive)
- $M_{a_y} = -0.5 M_y$ (en appuie intermédiaire)

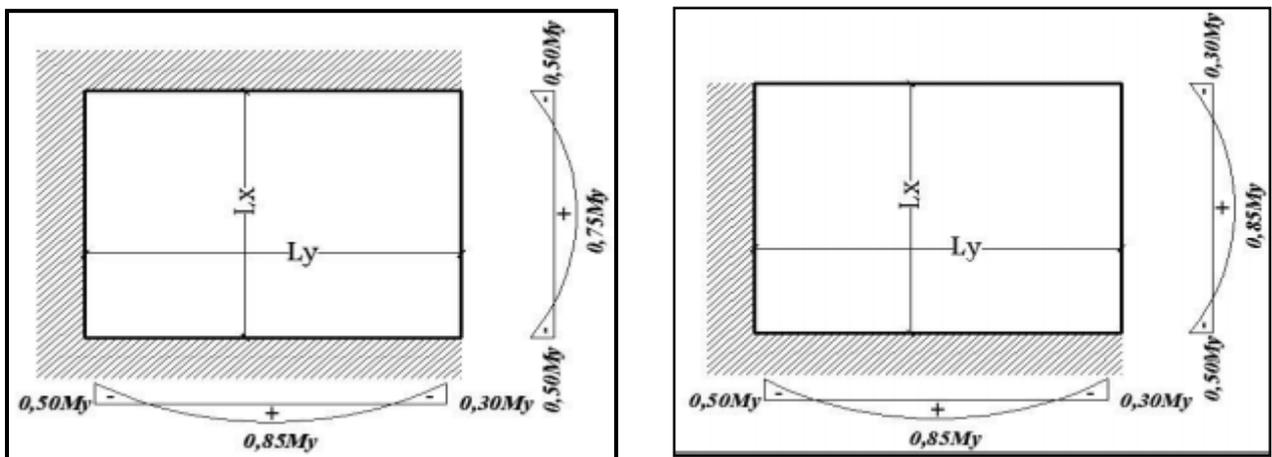


Figure IV.2 : Schéma des panneaux de rive

III.2.4- Distribution des panneaux de dalle sur le plan :

- Pour le plancher terrasse :

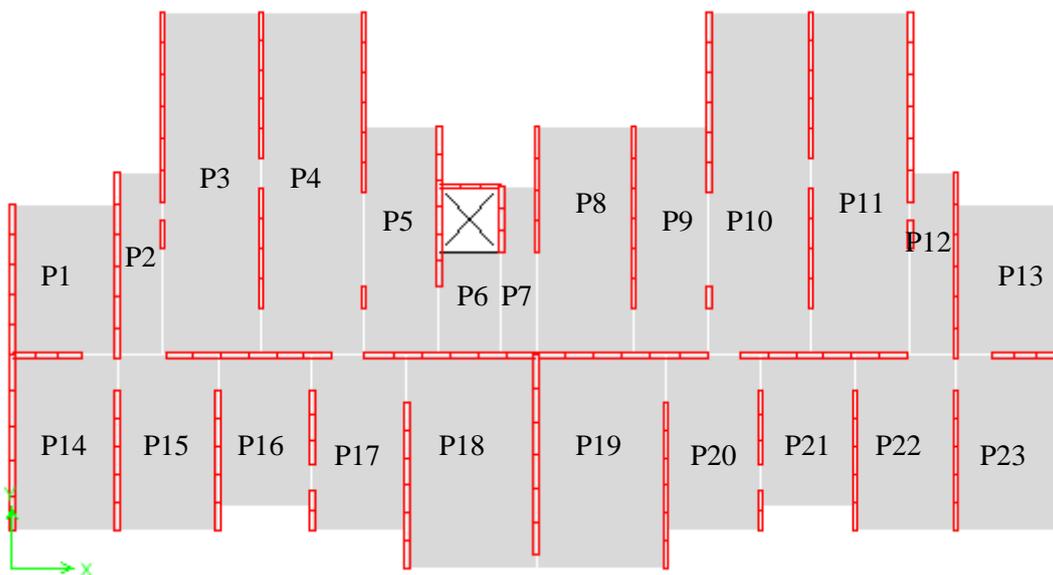


Figure IV.3 : Distribution des panneaux plancher terrasse

- Pour le Plancher des étages courants

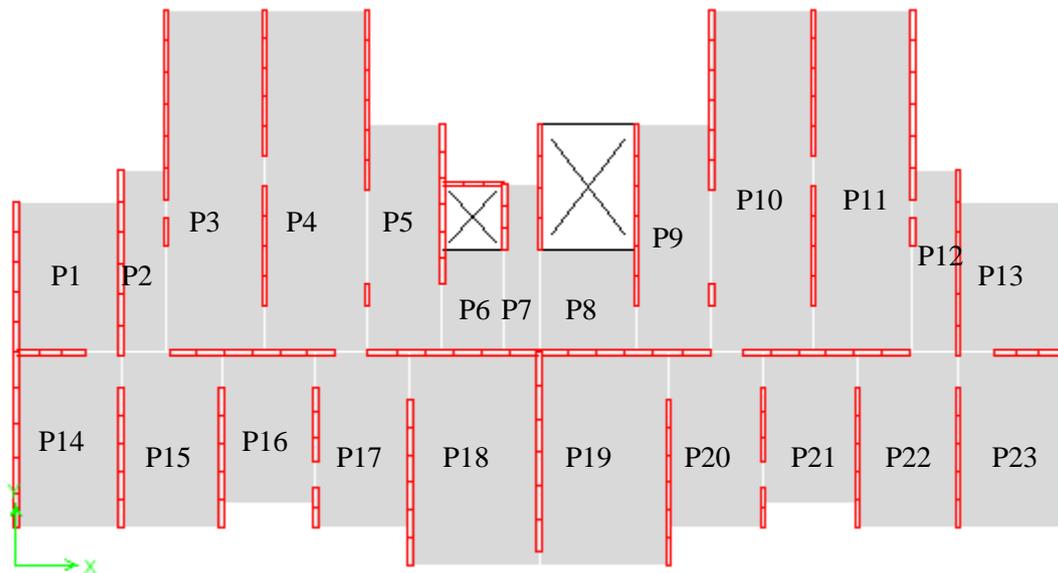
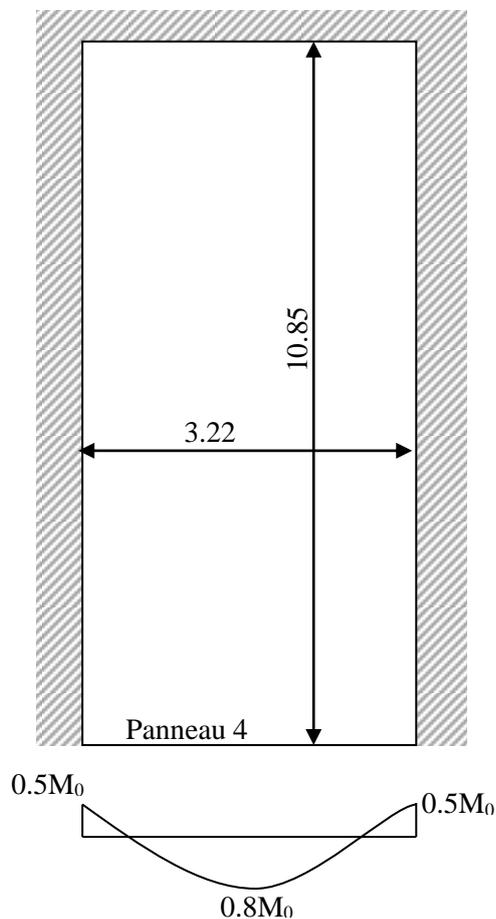


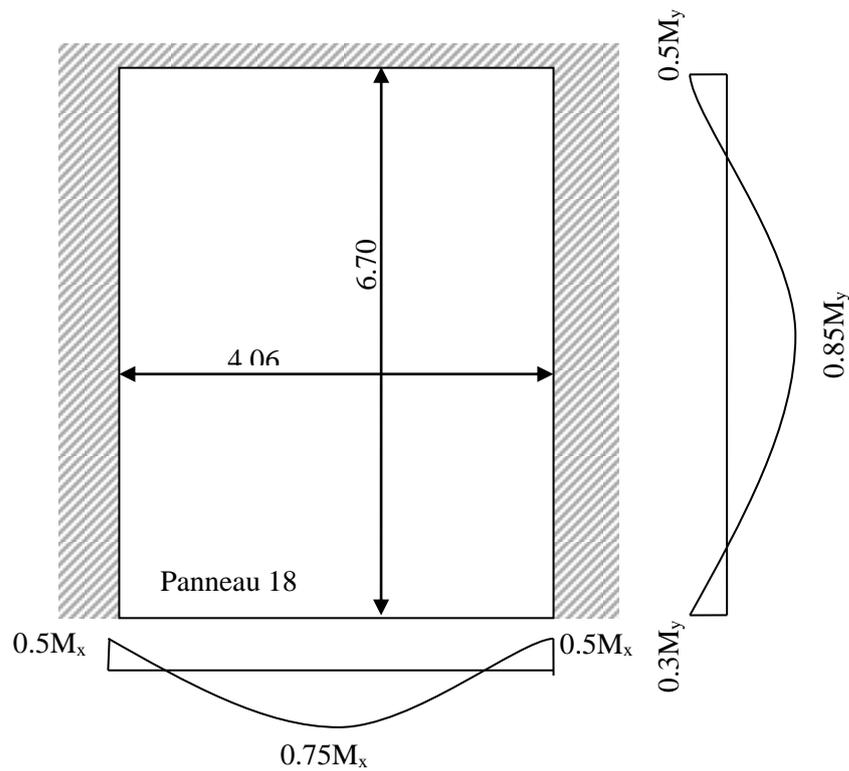
Figure IV.4 : Distribution des panneaux plancher étage courant

IV.2.5- Les panneaux les plus défavorables :

● Panneau de dalle portant dans une seule direction :



② Panneau dalle portant sur deux directions :



IV.3- Exemple de calcul

Pour le calcul on a :

IV.3.1- Panneau dalle travail sur les deux directions :

Nous prendrons comme exemple de calcul, le panneau de dalle (18)

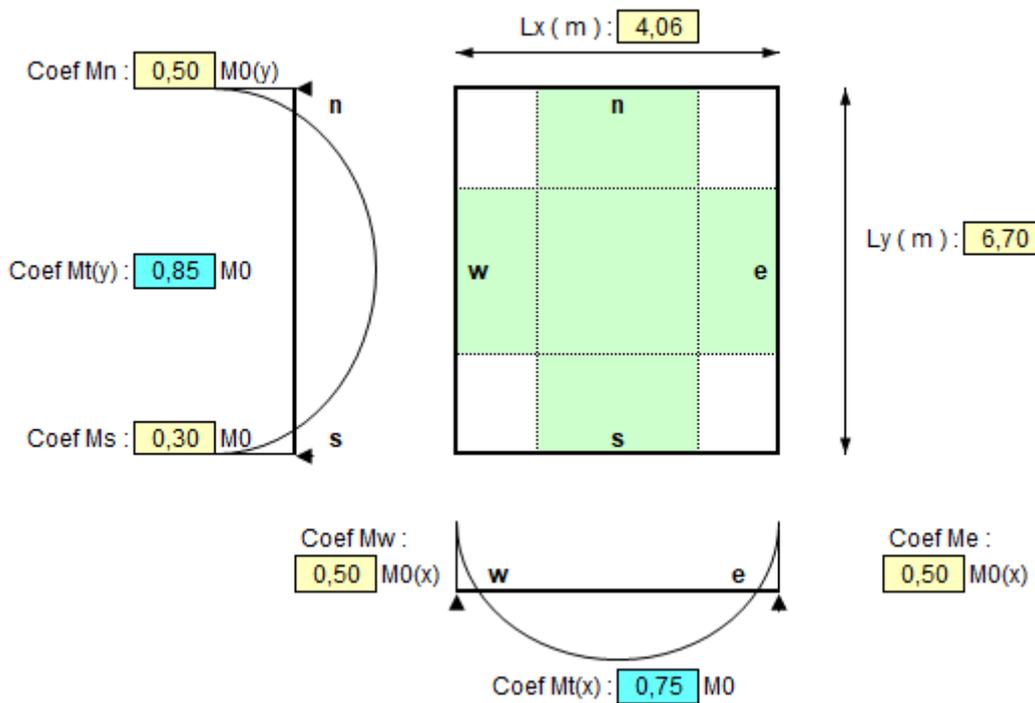


Figure IV.5 : Dalle sur 4 appuis.

$$\alpha = \frac{L_x}{L_y} = \frac{4.06}{6.7} = 0.60 > 0.4$$

⇒ La dalle travaille dans les deux sens

IV.3.1.1- Calcul les moments de RDC (commercial)

- Dans le sens de la petite portée : $M_x = \mu_x \cdot q \cdot L_x^2$
- Dans le sens de la grande portée : $M_y = \mu_y M_x$

$$\rho = 0.6 \Rightarrow \begin{cases} \mu_x = 0.081 \\ \mu_y = 0.305 \end{cases}$$

$$M_x = \mu_x \cdot q \cdot L_x^2 = 0.081 \times 13.2765 \times 4.06^2 = 17.72 \text{ kN.m}$$

$$M_y = \mu_y M_x = 0.305 \times 17.72 = 5.40 \text{ kN.m}$$

* *Moment en travée*

$$M_{tx} = 0.75 M_x = 13.23 \text{ kN.m}$$

$$M_{ty} = 0.85 M_y = 4.56 \text{ kN.m}$$

* *Moment en appuis*

$$M_{gx} = 0.5 M_x = 8.82 \text{ kN.m}$$

$$M_{dx} = 0.5 M_x = 8.82 \text{ kN.m}$$

$$M_{gy} = 0.5 M_y = 2.685 \text{ kN.m}$$

$$M_{dy} = 0.3 M_y = 1.62 \text{ kN.m}$$

IV.3.1.2- Ferrailage de la dalle de 4 appuis :

$b = 100 \text{ cm}$; $h = 15 \text{ cm}$; $d = 0.9h = 13.5 \text{ cm}$; $f_e = 500 \text{ MPa}$; $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$; $f_{t28} = 2.1 \text{ MPa}$
 $\sigma_s = 435 \text{ MPa}$

Tableau IV.1 : Ferrailage de la dalle pleine sur 4 appuis.

	plancher	Travée		Appuis			
		Xx	Yy	gx	dx	gy	dy
moments	PT	11,81	4,08	7,87	7,87	2,40	1,44
	EC	9,49	3,28	6,33	6,33	1,93	1,16
	RDC(commerce)	13,23	4,57	8,82	8,82	2,69	1,62
	Ssol	6,67	2,31	4,45	4,45	1,36	0,81
section d'armature	PT	2,51	0,79	1,41	1,37	0,57	0,28
	EC	1,7	0,59	1,13	1,13	0,39	0,2
	RDC(commerce)	2,51	0,79	1,57	1,57	0,57	0,28
	Ssol	1,41	0,39	0,79	0,79	0,28	0,2

IV.3.2- Panneau dalle travaille dans un seul sens

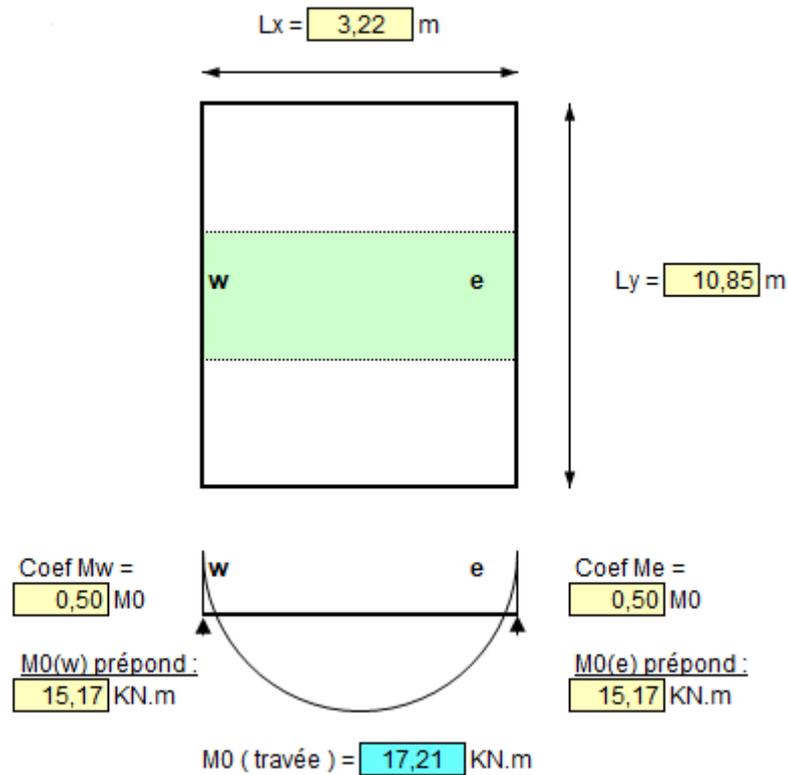


Figure IV.6 :Dalle sur 2 appuis.

$$\alpha = \frac{L_x}{L_y} = \frac{3.22}{10.85} = 0.29 < 0.4$$

⇒ La dalle travaille dans un seul sens

IV.3.2.1- Calcul des moments de RDC (habitation)

- **Moment isostatique**

$$M_0 = \frac{q_u \times L_x^2}{8} = \frac{9,53 \times 3.20^2}{8} = 12,20 \text{ kN.m}$$

- **Moment en travée**

$$M_t = 0.8M_0 = 13,76 \text{ kN.m}$$

- **Moment en appuis**

$$M_{ag} = M_{ad} = 0.5M_0 = 8.605 \text{ kN.m}$$

IV.3.2.2- Ferrailage de la dalle de 2 appuis :

Tableau IV.2 : Ferrailage de la dalle pleine sur 2 appuis.

	plancher	Travée	Appuis	
		Xx	gx	dx
moments	PT	12,29	7,68	7,68
	EC	9,88	6,17	6,17
	RDC (hab)	13,77	8,60	8,60
	Ssol	6,94	4,34	4,34
section d'armature	PT	2,51	1,37	1,37
	EC	1,98	1,13	1,13
	RDC (hab)	2,51	1,7	1,7
	Ssol	1,41	0,79	0,79

IV.4- Les conclusions de ferrailage

IV.4.1- Conclusion sur le ferrailage de la dalle plancher RDC :

- *Partie sup :*

$A_x = 1.89 \text{ cm}^2$

$A_y = 1.28 \text{ cm}^2$

Nappe en treille soudé T6x7/ e=15x15cm

- *Partie inf :*

$A_x = 2.57 \text{ cm}^2$

$A_y = 1.28 \text{ cm}^2$

Nappe en treille soudé T7x7 / e=15x15cm

Soit un ferrailage composé de T7x7 / e=15x15cm en nappe inférieure et T6x6 / e=10x10cm en nappe supérieure.

➤ **Espacement**

- *En travée*

Nappe inférieure : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{verifier}$

Nappe supérieure : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{vérifier}$

- *En appuis*

Sens x-x : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{vérifier}$

Sens y-y : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{verifier}$

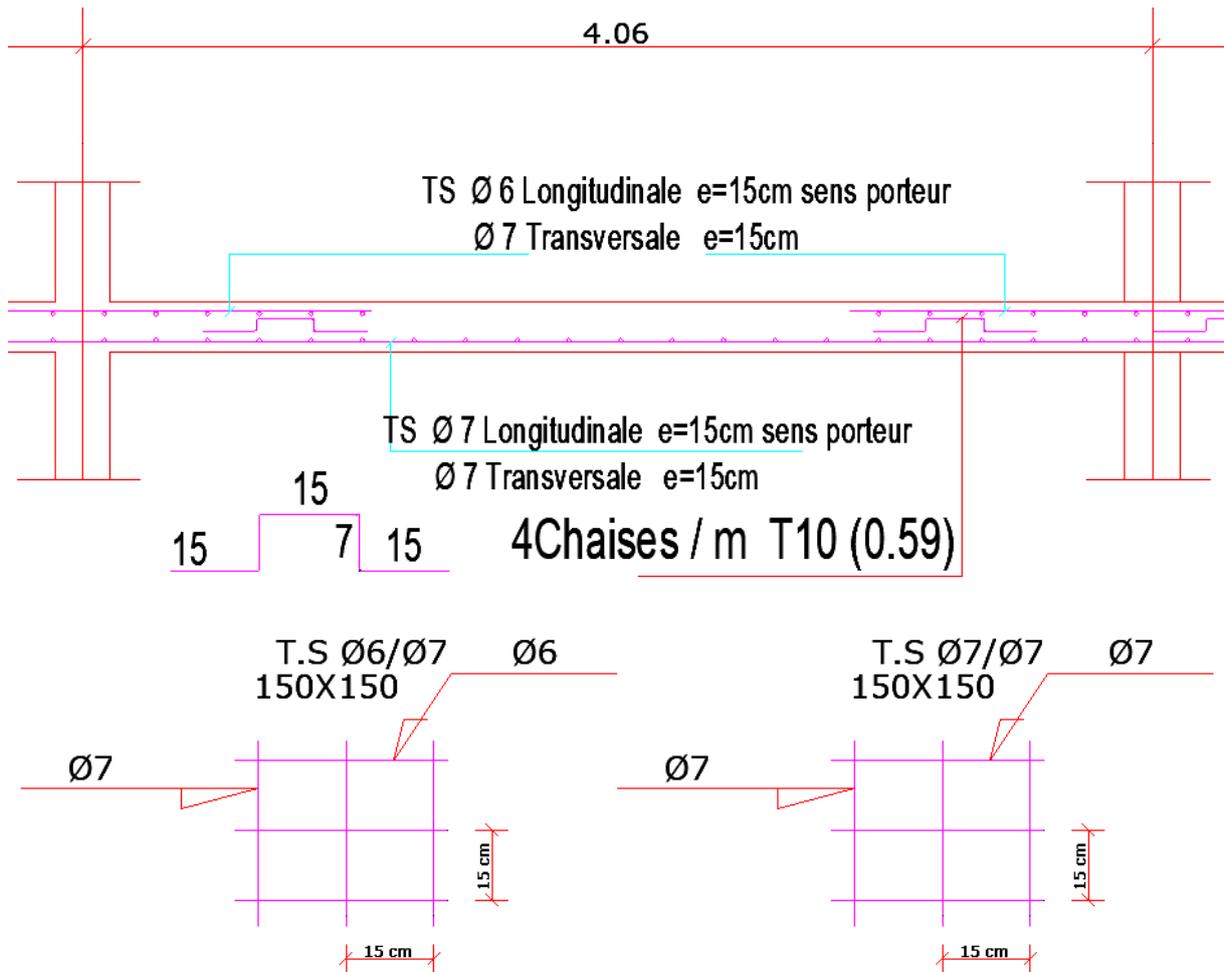


Figure IV.7 : Schéma de ferrailage plancher RDC

IV.4.2- Conclusion sur le ferrailage de la dalle plancher étage courant :

- **Partie sup :**

$A_x = 1.19 \text{ cm}^2$

$A_y = 1.19 \text{ cm}^2$

Nappe en treille soudé T5.5x5.5 / e=10x10cm

- **Partie inf :**

$A_x = 2.57 \text{ cm}^2$

$A_y = 1.28 \text{ cm}^2$

Nappe en treille soudé T7x7 / e=15x15cm

➤ **Espacement**

- **En travée**

Nappe inférieure : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{vérifier}$

Nappe supérieure : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{vérifier}$

- *En appuis*

Sens x-x : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{vérifier}$

Sens y-y : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{vérifier}$

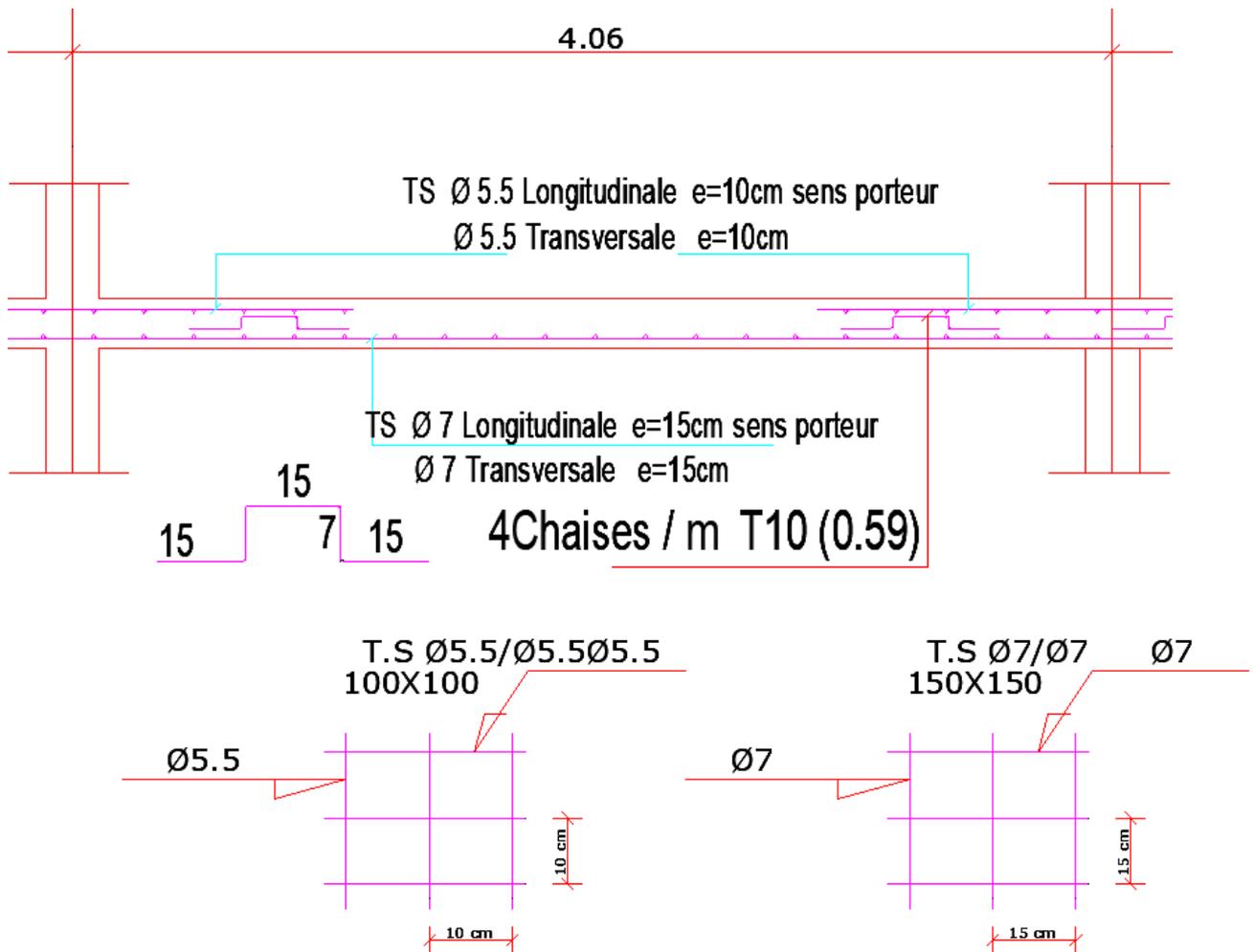


Figure IV.8 Schéma de ferrailage plancher étage courant

IV.4.3- Conclusion sur le ferrailage de la dalle plancher terrasse :

- *Partie sup :*

$A_x = 1.42 \text{ cm}^2$

$A_y = 1.42 \text{ cm}^2$

Nappe en treille soudé T6x6 / e=10x10cm

- *Partie inf :*

$A_x = 2.57 \text{ cm}^2$

$A_y = 1.28 \text{ cm}^2$

Nappe en treille soudé T7x7 / e=15x15cm

➤ **Espacement**

- *En travée*

Nappe inférieure : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{vérifier}$

Nappe supérieure : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{vérifier}$

- *En appuis*

Sens x-x : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{vérifier}$

Sens y-y : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{vérifier}$

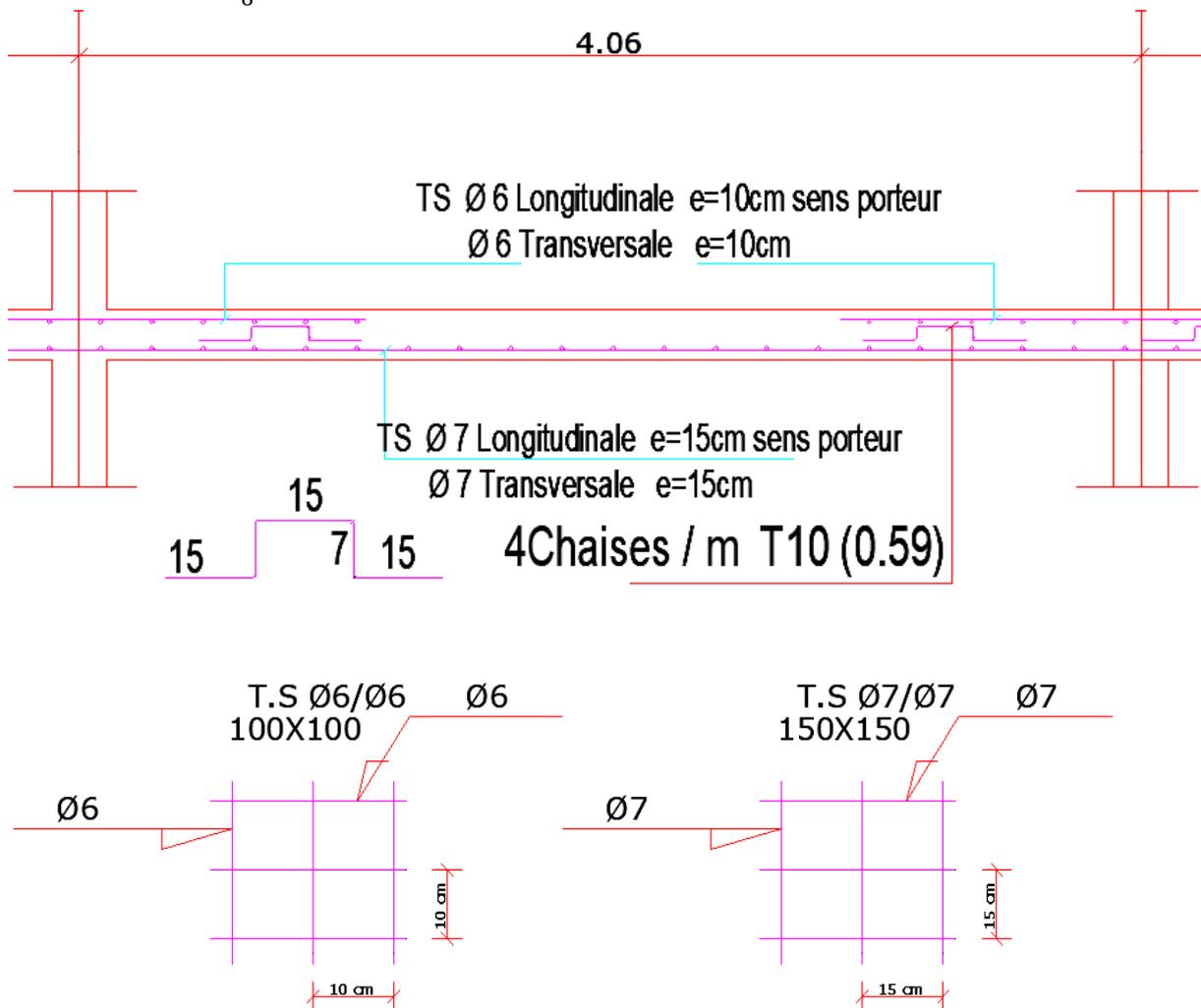


Figure IV.9 Schéma de ferrailage plancher terrasse

IV.4.4- Conclusion sur le ferrailage de la plancher Ssol :

- *Partie sup :*

$A_x = 0.8 \text{ cm}^2$

$A_y = 0.99 \text{ cm}^2$

Nappe en treille soudé T4.5x4.5 / e=10x10cm

- *Partie inf :*

$A_x = 1.42 \text{ cm}^2$

$A_y = 1.42 \text{ cm}^2$

Nappe en treille soudé T6x6 / e=10x10cm

➤ **Espacement**

- *En travée*

Nappe inférieure : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{vérifier}$

Nappe supérieure : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{vérifier}$

- *En appuis*

Sens x-x : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{vérifier}$

Sens y-y : $esp = \frac{100}{6} = 16.66 < \text{Min}(3h; 33\text{cm}) = 33 \text{ cm} \dots\dots\dots \text{vérifier}$

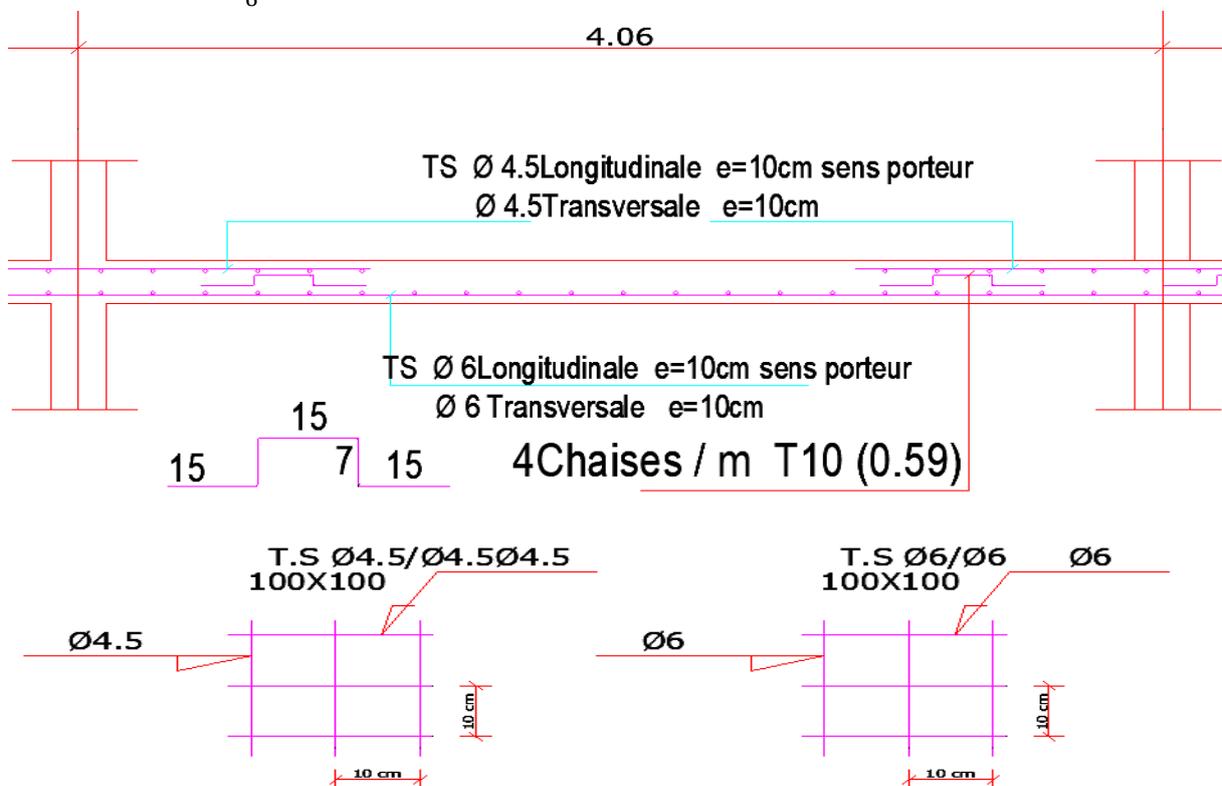


Figure IV.10 Schéma de ferrailage plancher sous sol

IV.5- Vérification De La Contrainte Dans Le Béton

- **Exemple de calcul**

Il faut que $\sigma_{bc} \leq \bar{\sigma}_{bc}$

$$\sigma_{bc} = \frac{M_{ty(ser)}}{I} \times y_1 ; \text{ Avec } y_1 \text{ la racine positive de l'équation (E).}$$

$$(E) : \frac{b}{2} \times y_1^2 + 15 \times A_{ty} \times y_1 - 15 \times A_{ty} \times d = 0$$

Avec :

$$b = 1 \text{ m} ; A_{ty} = 1.28 \text{ cm}^2 ; d = 0.9 \times h = 0.135 \text{ m}$$

AN:

$$(E) : 0.5y_1^2 + 0.00192y_1 - 2.592 \times 10^{-4} = 0$$

$$y_1 = 0.02108 \text{ m}$$

$$I = \frac{b \times y_1^3}{3} + 15 \times A_{ty} \times (d - y_1)^2$$

AN :

$$I = 0.28 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$\sigma_{bc} = \frac{3.31}{0.28 \times 10^{-4}} \times 0.02108 = 2489.74 \text{ kN.m} = 2.48 \text{ MPa}$$

$$\bar{\sigma}_{bc} = 0.6 \times f_{c28} = 0.6 \times 25 = 15 \text{ MPa}$$

Donc :

$$\sigma_{bc} \leq \bar{\sigma}_{bc} \dots\dots\dots \text{condition vérifié}$$

Pour les autres etage on les resumes dans le tableaux suivant :

Tableau IV.3 : Verification des contraintes

Mty (KN.m)	Aty (m²)	b(m)	d(m)	y(m)	I(m⁴)	σ _{bc} (Mpa)	σ̄ _{bc} (Mpa)	σ _{bc} ≤ σ̄ _{bc}
3,05	0,000128	1	0,135	0,02108	2,804E-05	2,29	15	oui
2,43	0,000128	1	0,135	0,02108	2,804E-05	1,82	15	oui
3,31	0,000128	1	0,135	0,02108	2,804E-05	2,49	15	oui
4,76	0,000142	1	0,135	0,02187	3,074E-05	3,38	15	oui

Chapitre V



Etude des éléments

non structuraux

Étude des éléments non structuraux

V.1- Introduction :

Les éléments non structuraux sont des éléments qui ne font pas partie du système de contreventement ni du système porteur, leur rôle est d'assurer la sécurité et le confort des usagers. Ces éléments doivent avoir un comportement adéquat en cas de séisme, ils doivent donc être réalisés conformément aux recommandations des règlements parasismiques tout en vérifiant leur résistance à un séisme important, car dans ce dernier cas ils peuvent être sollicités par l'ossature qui se déforme, ils peuvent même modifier la période d'oscillation de la structure et créer une torsion d'ensemble.

Dans ce chapitre, on va aborder le calcul des éléments non structuraux suivants :

- L'acrotère,
- Les escaliers,
- L'ascenseur.

V.2- L'acrotère :

L'acrotère est un élément non structural, il sera calculé comme une console encastrée au niveau du plancher terrasse qui est la section dangereuse, d'après sa disposition, l'acrotère est soumis à une flexion composée due aux charges suivantes :

- ♦ Son poids propre sous forme d'un effort normal vertical.
- ♦ Une charge d'exploitation horizontale égale à 1KN/ml due à la main courante.

V.2.1- Calcul de l'acrotère

Le calcul de l'acrotère se fait pour une bande de 1m de largeur dont les dimensions sont les suivantes:

Largeur $b=100\text{cm}$

Hauteur $H=60\text{cm}$

Épaisseur $e=10\text{cm}$

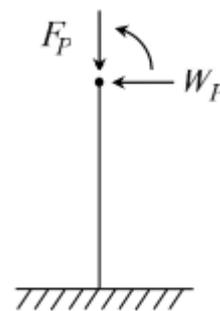
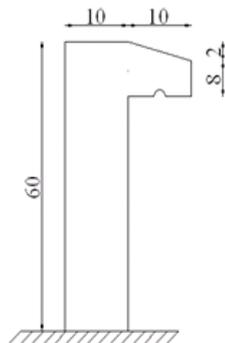


Figure.V.1 : Coupe Verticale sur l'acrotère.

Figure.V.2 : Schéma statique.

V.2.2- Evaluation des charges :**V.2.2.1- Charges permanentes :**

- Surface de l'acrotère :

$$S = \left[(0,1 \times 0,6) + (0,1 \times 0,08) + \frac{(0,1 \times 0,02)}{2} \right] = 0,069 \text{ m}^2$$

- Poids propre de l'acrotère :

$$G = \rho_b \times S = 25 \times 0,069 = 1,725 \text{ kN/ml}$$

- Revêtement en ciment ($e=2\text{cm}$; $\rho=14\text{kN/m}^3$) :

$$G = \rho_{ci} \times e \times P_{cme} = 14 \times 0,02 \times (60 + 10) \times 2 \times 10^{-2} = 0,392 \text{ kN/ml}$$

$$G=2,117\text{kN/ml}$$

V.2.2.2- Charge d'exploitation :

- $Q=1,00\text{kN/ml}$

V.2.2.3- Action des forces horizontales Q_h : (F_p)

L'action des forces horizontales est donnée par : $F_p=4.A.C_p.W_p$.

Avec :

A : Coefficient d'accélération de zone obtenu dans le tableau (4-1) pour la zone et le groupe d'usage appropriés [$A=0,15$].....groupe 2

C_p : Facteur de force horizontale donné par le tableau (6-1)..... [$C_p=0,8$].

W_p : Poids de l'acrotère =2,117kN.

$F_p=4 \times 0,15 \times 0,8 \times 2,117=1,0416\text{kN}$.

$Q_u=\text{Max}(1,5Q ; F_p)$

$$\left. \begin{array}{l} F_p = 1,0416\text{kN} \\ 1,5Q = 1,5\text{kN} \end{array} \right\} \Rightarrow Q_u = Q_h = 1,5\text{kN}$$

Donc pour une bande de 1m de largeur :

$G=2,117\text{kN/ml}$ et $Q=1,5\text{kN/ml}$

V.2.2.4- Calcul des efforts :

Pour une bande de 1m de largeur :

- **E.L.U :**

$$N_u=1,35G=1,35 \times 2,117=2,858\text{kN}$$

$$M_u=1,5 \times F_p \times h=(1,5 \times 1,0416) \times 0,6=0,94\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$T_u=1,5 \times F_p =1,5 \times 1,0416=1,56\text{kN}$$

• **E.L.S :**

$$N_{ser}=G=2,117kN$$

$$M_{ser}= F_p \times h = 1,0416 \times 0,6 = 0,624 Kn.m$$

$$T_{ser}= F_p = 1,0416kN$$

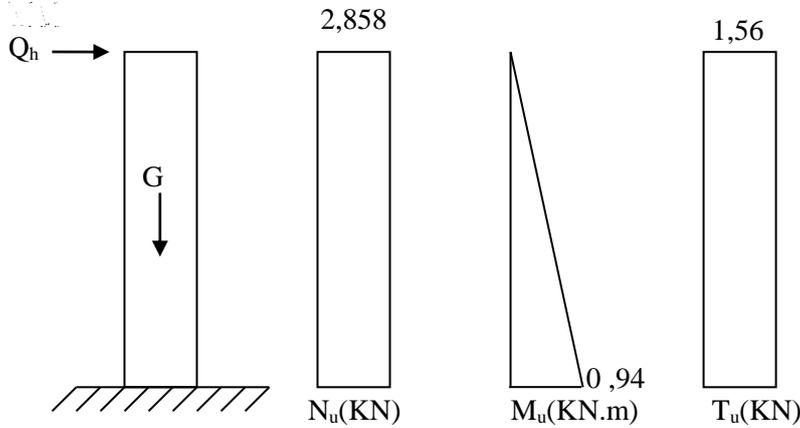


Figure.V.3:Diagramme des efforts à(E.L.U)

V.2.3- Ferrailage de l'acrotère :

$$h=10cm ; b=100cm ; f_{c28}=25MPa ; \sigma_{bc}=14,17MPa ; c=c'=2cm ; f_e=500MPa$$

Calcul de l'excentricité:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_0 = \frac{M_u}{N_u} = \frac{0,94}{2,858} = 32,89cm \\ \frac{h}{2} - c' = \frac{10}{2} - 2 = 3cm \end{array} \right. \Rightarrow e_0 > \frac{h}{2} - c' \Rightarrow \text{Section partiellement comprimée.}$$

centre de pression se trouve à l'extérieur de la section.

Les armatures seront calculé à la flexion simple en équilibrant le moment fictif M_f .

Tableau.V.1 : Ferrailage de l'acrotère

σ_{bc}	H(cm)	d	M_f	μ	α	z	A_{sf}	A_u	A_s	choix
14.16	10	9	1.025	0.0089	0.0112	8.959	26.31	26.30	$\begin{cases} A_{s1} = 0 \text{ cm}^2 \\ A_{s2} = 0.26 \text{ cm}^2 \end{cases}$	4T10=3.14

V.2.4- Vérification de la section d'acier selon «BAEL 91Modifié 99» [1] :

Il faut vérifier A_s avec la section minimale imposée par la règle du millième et par la règle de non fragilité :

$$A_s^{min} \geq \text{Max} \left\{ \frac{bh}{1000} ; 0.23db \frac{f_{t28}}{f_e} \right\}$$

Avec :

$$f_{t28}=2,1\text{MPa} ; f_e=500\text{MPa} ; b=100\text{cm} ; d=9\text{cm}$$

$$A_s^{min} \geq \text{Max}\{1\text{cm}^2; 0.8694\text{cm}^2\} = 1\text{cm}^2$$

Donc : on opte finalement pour $4T10=3.14\text{cm}^2$ Avec un espacement $S_t = \frac{100}{5} = 20\text{cm}$

V.2.4.1- Armatures de répartitions :

$$A_s \geq \frac{A_t}{4} \Rightarrow A_t \geq 0.25\text{cm}^2$$

On choisit $4T8=2,01\text{cm}^2$ avec un espacement $S_t = \frac{60-5}{3} = \frac{55}{3} = 18.33\text{cm} \approx 18\text{cm}$

V.2.4.2- Vérification à L'E.L.S :

La fissuration est considérée comme préjudiciable.

$$e_0 = \frac{M_{ser}}{N_{ser}} = 29,47 \text{ cm}$$

On a : $e_0 > \frac{h}{2} - c' \Rightarrow$ La section est partiellement comprimée (SPC).

C : La distance entre le centre de pression et la fibre la plus comprimée.

$$C = d - e_A$$

$$\text{Avec : } e_A = \frac{M_{ser}}{N_{ser}} + \left(d - \frac{h}{2}\right) = 33,47\text{cm} \Rightarrow C = -43\text{cm} \quad (C < 0)$$

D'après le « **BAEL 91 modifié 99** », on doit résoudre l'équation suivant :

$$y_c^3 + p y_c + q = 0$$

y_c : Distance entre le centre de pression et l'axe neutre.

Avec :

$$n = 15 ; \begin{cases} p = -3c^2 + 6n(c - c') \frac{A_s}{b} + 6n(d - c) \frac{A_s}{b} = -5467.44 \\ \text{et} \\ q = -2c^3 - 6n(c - c') \frac{A_s}{b} - 6n(d - c)^2 \frac{A_s}{b} = 154876.88 \end{cases}$$

La solution de l'équation du troisième degré est obtenue par :

$$\Delta = q^2 + \left(\frac{4p^3}{27}\right) = -2,261.10^8$$

$$\cos \varphi = \frac{3q}{2p} \sqrt{\frac{-3}{p}} = -0,99 \Rightarrow \varphi = 171,89^\circ$$

$$a = 2\sqrt{\frac{-P}{3}} = 85,38$$

$$y_1 = a \cos\left(\frac{\varphi}{3} + 120\right) = -85,28 \text{ cm}$$

$$y_2 = a \cos\left(\frac{\varphi}{3}\right) = 46,13 \text{ cm}$$

$$y_3 = a \cos\left(\frac{\varphi}{3} + 240\right) = 39,16 \text{ cm}$$

La solution qui convient est : $y_c = 46,13 \text{ cm}$

Car : $0 < y_{ser} = y_c + c < d$

$$0 < y_{ser} = 46,13 - 43 = 3,13 \text{ cm} < 9 \text{ cm}$$

$$\text{Donc : } \begin{cases} y_{ser} = 3,13 \text{ cm} \\ y_c = 46,13 \text{ cm} \end{cases}$$

V.2.4.3- Calcul du moment d'inertie :

$$I = \frac{b}{3} y_{ser}^3 + n \left[A_s (d - y_{ser})^2 + A'_s (y_{ser} - c')^2 \right] = 1900,79 \text{ cm}^4 \quad ; \quad n = 15$$

V.2.5- Vérification des contraintes :

V.2.5.1- Contrainte du béton :

$$\sigma_{bc} = \left(\frac{N_{ser}}{I} y_c \right) y_{ser} \leq \bar{\sigma}_{bc} = 0,6 f_{c28} = 15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{bc} = \left(\frac{2,117.10^3 \times 46,13.10}{1900,79.10^4} \right) \times 31,3 = 1,608 \text{ MPa} < \bar{\sigma}_{bc} \dots \dots \dots \text{vérifiée}$$

V.2.5.2- Contraintes de l'acier :

$$\sigma_s = 45,238 \text{ MPa} < \bar{\sigma}_s \dots \dots \dots \text{vérifiée}$$

$$\sigma'_s = 8,708 \text{ MPa} < \bar{\sigma}'_s \dots \dots \dots \text{vérifiée}$$

V.2.5.3- Vérification de l'effort tranchant :

La contrainte de cisaillement est donnée par la formule suivante :

$$\tau_u = \frac{T_u}{bd} \leq \bar{\tau}_u = \text{Min}\{0,1 f_{c28}; 4 \text{ MPa}\} = 2,5 \text{ MPa}$$

$$\tau_u = \frac{1,56.10^3}{90.10^3} = 0,017 \text{ MPa} < \bar{\tau}_u \dots \dots \dots \text{vérifiée}$$

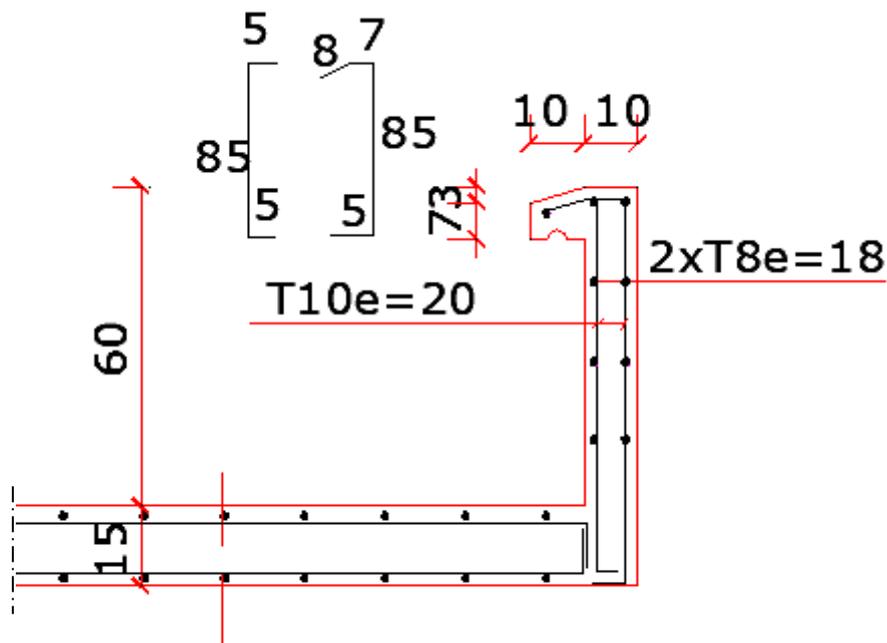


Figure.V.4. Schéma de ferrailage de l'acrotère.

V.3- Escalier :

Les escaliers sont des éléments constitués d'une succession de gradins, ils permettent le passage à pied entre différents niveaux du bâtiment.

Notre bâtiment comporte un seul type d'escalier.

V.3.1- Définition des éléments d'un escalier :

On appelle "marche" la partie horizontale (M) des gradins constituant l'escalier, et "contre marche" la partie verticale (C.M) de ces gradins.

- 1-**Le palier** : partie horizontale de départ, d'arrivée d'un escalier,
- 2-**la paillasse** : partie inclinée servent de support aux marches et contremarches ,
- 3-**Le volé** : ensemble de marches (3 au minimum) de palier a palier,
- 4-**la contre marche** : surface verticale plane relie deux marches successives,
- 5-**La marche** : surface horizontal plane, sur laquelle on pose le pied.

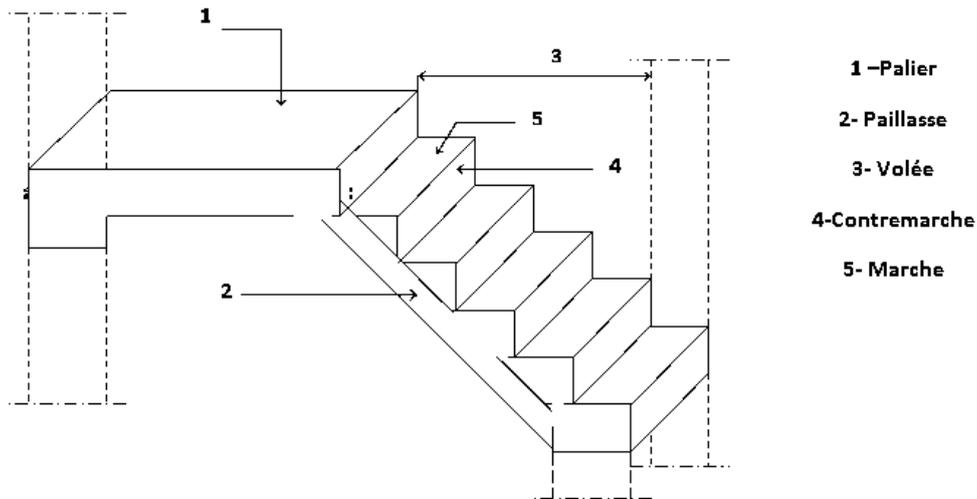


Figure V.5: Schéma de l'escalier.

V.3.2- Dimensionnement d'escalier :

Pour le dimensionnement de la marche « G » et la hauteur de contre marche « h », on utilise la formule de « **BLONDEL** ».

$$59 \leq g + 2h \leq 66$$

$$H = h * n \Rightarrow h = H/n$$

$$L = G(n-1) \Rightarrow G = \frac{L}{n-1}$$

Avec :

n : nombre de contre marches.

n - 1 : nombre de marches.

H : Hauteur à monter.

L : longueur de la foulée

h : longueur de la contre marche.

G : longueur de la marche

$$59 \leq \frac{2H}{n} + \frac{L}{n-1} \leq 64$$

$$64n^2 - (64 + 2H + L)n + 2H = 0$$

$$64n^2 - (64 + 2 * 153 + 243)n + 2 * 153 = 0$$

$$64n^2 - 613n + 306 = 0$$

$$\Delta = B^2 - 4.A.D = 613^2 - 4 * 64 * 306 = 297433$$

$$\sqrt{\Delta} = \sqrt{297433} = 545,37$$

$$n1 = \frac{613 + 545,37}{2 * 64} = 9,05$$

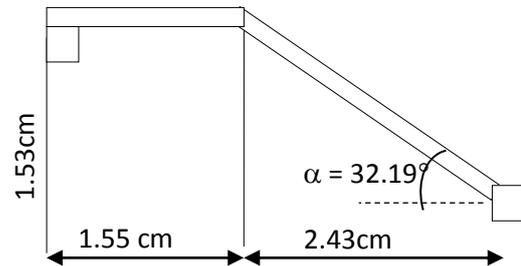


Figure V.6: Dimensionnement d'escalier

On prend : $n = 10 \Rightarrow n-1 = 9$

$$h = \frac{H}{n} = \frac{153}{10} = 15,3 \text{ cm} \quad \text{on prend : } h = 17 \text{ cm}$$

$$G = \frac{L}{n-1} = \frac{243}{9} = 27$$

Vérification : $59 \leq 27 + 2 \times 17 \leq 64 \dots\dots\dots (C.V)$

➤ **Epaisseur de la paillasse et le palier :**

$$L = \sqrt{l^2 + H^2} + 155 = \sqrt{243^2 + 153^2} + 155 = 443,23 \text{ cm}$$

$$\frac{L}{30} \leq e \leq \frac{L}{20} \Rightarrow \frac{443,23}{30} \leq e \leq \frac{443,23}{20} \Rightarrow 14,77 \text{ cm} \leq e \leq 22,16 \text{ cm}$$

On prend donc l'épaisseur $e = 20 \text{ cm}$

➤ **Angle d'inclinaison de la paillasse**

$$\tan \alpha = \frac{H}{L} = \frac{153}{243} = 0,62 \Rightarrow \alpha = 32,19^\circ$$

V.3.3- Descente des charges des escaliers :

Tableau V.2: Evaluation des charges et surcharges pour le palier

Eléments	Poids volumique (kN/m ³)	Charge (kN/m ²)
Poids propre du palier (e=20cm)	25×0,2	5
Mortier de pose (e=3cm)	20× 0,03	0,6
Carrelage (e=2cm)	20× 0,02	0,4
Enduit de ciment (e=2cm)	18× 0,02	0,36

$$\Sigma G = 6,36 \text{ KN/m}^2 \quad Q = 2,5 \text{ KN/m}^2$$

Tableau V.3. Evaluation des charges et surcharges pour la paillasse :

Eléments	Poids volumique (kN/m ³)	Charge (kN/m ²)
Poids propre de la paillasse	25×0,2/ cos (32,19)	5,91
Poids propre de la marche	22×0,17/2	2,13
Carrelage (2cm)	20×0,02	0,40
Mortier de pose (2cm)	20×0,02	0,40
Enduit de ciment	18 ×0,02	0,36
garde corps en maçonnerie	/	1,62

$$\Sigma G = 10,82 \text{ KN/m}^2 ; \quad Q = 2,5 \text{ KN/m}^2$$

Tableau V.4. Combinaisons des charges :

	G (KN/m ²)	Q (KN/m ²)	ELU	ELS
Pillasse	10,82	2,5	18,36	13,32
Palier	6,36	2,5	12,34	8,86

V.3.4- Les réactions d'appuis

ELU :

$R_a = 27,9\text{KN}$

$R_b = 33,05\text{KN}$

ELS :

$R_a = 20,12\text{KN}$

$R_b = 23,92\text{KN}$

V.3.5- calcul des efforts tranchants et des moments fléchissons (M) :

⇒ELU :

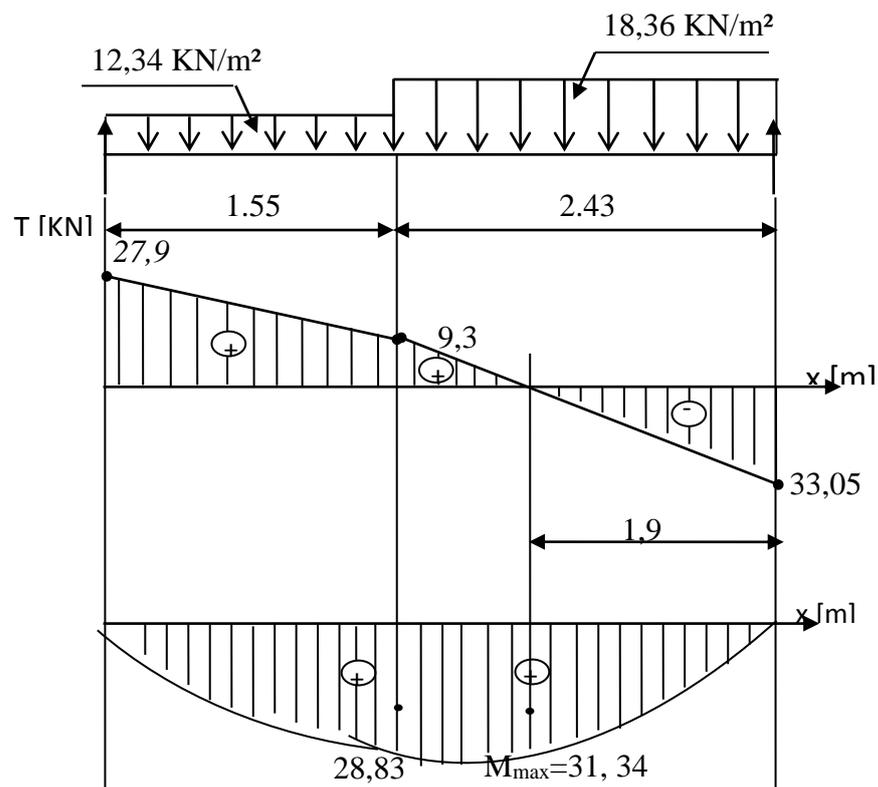


Figure V.7 : Diagrammes des sollicitations.

⇒ELS :

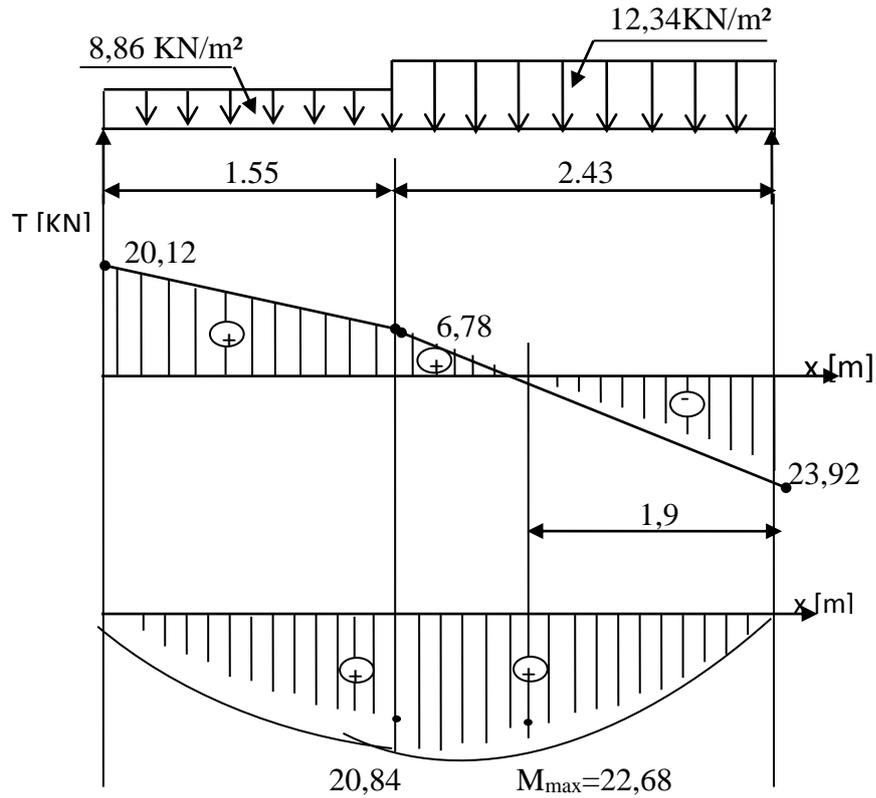


Figure V.8 : Diagrammes des sollicitations.

Tableau V.5 :Caractéristiques géométriques et mécaniques

f_{c28} (MPa)	f_e	γ_b	γ_s	h(cm)	b(cm)	d	f_{bc}	σ_s
25	500	1.5	1.15	20	100	18	14.17	435

V.3.6- Ferrailage des escaliers :

Tableau.V.6 Ferrailage de l'escalier,

	M_u (KN.m)	μ	$\mu \leq \mu_{AB}$	A_s	α	β	A_s (cm)	choix	A_s
Trav	25,07	0.055	oui	0	0.071	0,97	3,69	5T10	3.93
App	6,268	0.014	oui	0	0,018	0.99	0,9	4T8	2.01

Tableau .V.7 :Vérification des contraintes,

	Mser (KN.m)	As (cm²)	Y (cm)	I (cm4)	σ_{bc} (MPa)	$\sigma_b \leq \overline{\sigma_b}$
Travée	18,144	2,36	3,21	8846,079	1,85	Vérifiée
Appuis	4,54	0,59	1,71	2515,15	1,16	Vérifiée

V.3.7- La poutre palière :

$$L=2,85\text{m}$$

$$\frac{L}{15} \leq h_t \leq \frac{L}{10} \Rightarrow 19 \leq h_t \leq 28,5 \text{ donc on prendre } h_t = 30 \text{ cm}$$

$$0,3 h_t \leq b \leq 0,7 h_t \Rightarrow 9 \leq b \leq 21 \text{ on prendre } b = 30 \text{ cm}$$

➤ **vérification selon RPA99**

$$\checkmark b > 20\text{cm} \dots\dots\dots\text{C.V}$$

$$\checkmark h > 30\text{cm} \dots\dots\dots\text{C.V}$$

$$\checkmark \frac{h}{b} \leq 4 \dots\dots\dots\text{C.V}$$

$$\checkmark b_{\max} < 1,5 h + b_1 \dots\dots\dots\text{C.V}$$

Donc la section de la poutre palière (30x x30).

V.3.8- descente de charge

- poids propre de la poutre palière : $G = 25 \times 0,3 \times 0,3 = 2,25 \text{ KN/ml}$

- la réaction de l'escalier = $33,05 \text{ KN/ml}$

E.L.U.R

$$q = 1,35G + Re = 1,35 \times 2,25 + 33,05 = 36,09 \text{ KN/ml}$$

V.3.9- calcul des sollicitations :**Tableau.V.8 : Ferrailage de la poutre palière**

	$M_u(\text{KN.m})$	α	β	A_s (cm^2)	A_{\min}	$A = \max(A_s, A_{\min})$	choix	A_s
Travée	18,56	0,076	0,97	1,76	0,78	1,76	3T12	3,39
Appuis	8,73	0,072	0,97	0,81	0,78	0,81	3T12	3,39

V.3.10- Schéma de ferrailage des escaliers

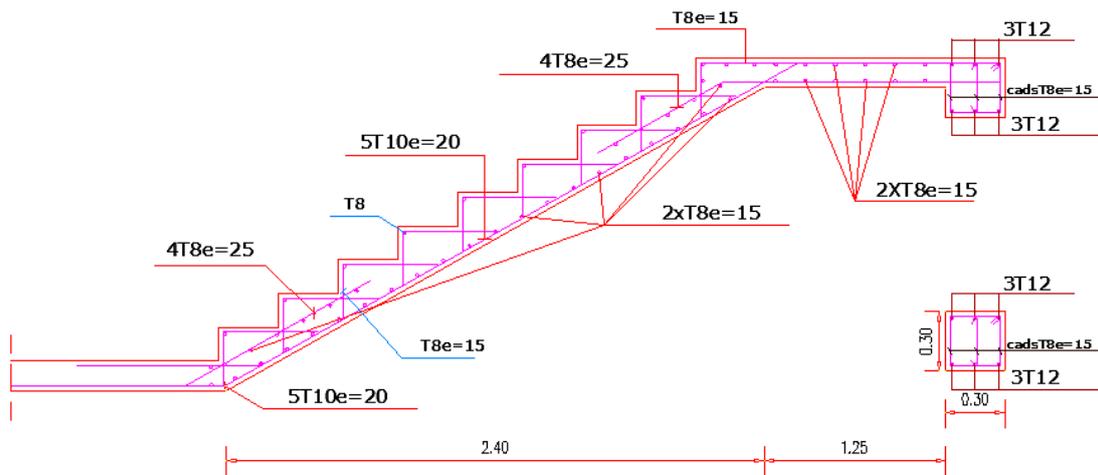


Figure.V.9 : Schéma de ferrailage des escaliers

V.4- Ascenseur :

L'ascenseur est un élément de confort nécessaire pour la circulation verticale prévu pour les structures de cinq (5) étages et plus, elle est composée essentiellement de trois constituants :

- 1- **La cabine ou la benne** : organe de l'ascenseur destiné à recevoir les personnes et les charges à transporter.
- 2- **Le treuil de levage et sa poulie** : est un cylindre horizontal mobil autour de son axe, sur lequel se roule ou déroule un câble qui sert à entrainer la cabine et roule ses mouvement démonté et de descendes.
- 3- **La contre poids** : a pour but d'équilibrer la cabine et la charge utile.

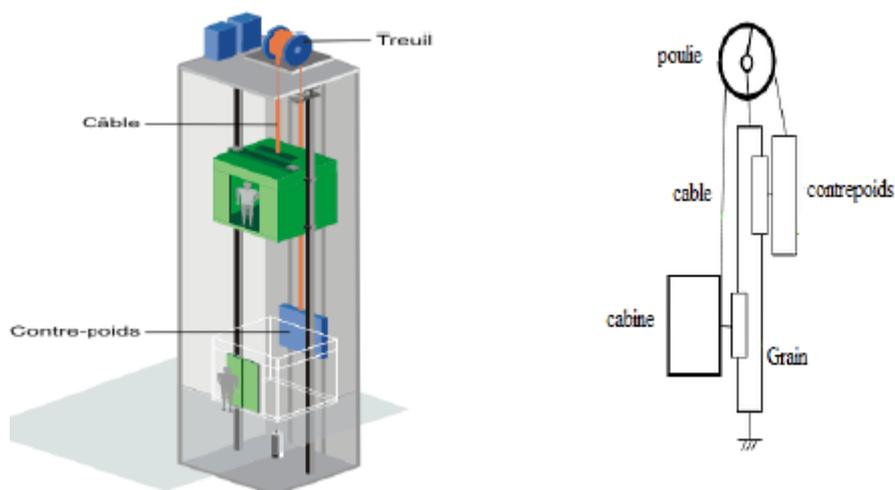


Figure V.10 : la cage d'ascenseur

V.4.1- Pré-dimensionnement :

La dalle d'ascenseur doit avoir une certaine rigidité vu le poids de la machine

Nous avons deux conditions à vérifier :

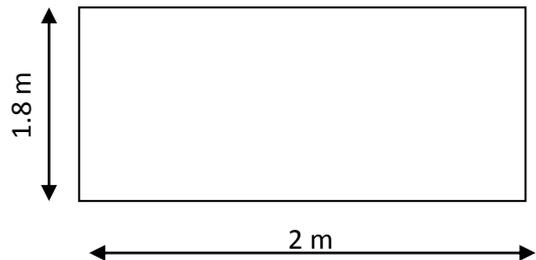


Figure V.11: Vue en plan de dalle machine

a- Résistance à la flexion :

$$\frac{L_x}{50} \leq e \leq \frac{L_x}{40} \Rightarrow \frac{180}{50} \leq e \leq \frac{180}{40}$$

$$\Rightarrow 3,6 \leq e \leq 4,5$$

b- Condition de l'E.N.A :

L'entreprise nationale des ascenseurs (E.N.A) préconise que l'épaisseur de la dalle machine est cm $e \geq 25$ cm

On prend : **e=25cm**

V.4.2- Détermination des charges et surcharges :

V.4.2.1- Charges permanentes :

- ✓ Poids de la dalle machine supportée..... 50,00 kN/m²
 - ✓ Poids propre de la dalle..... $0,25 \times 25 = 6,25$ kN/m²
- $\Rightarrow G = 56,25$ kN/m²

V.4.2.2- Surcharge d'exploitation : Q=1,00 kN/m²

V.4.3- Combinaison des charges :

- ✓ **E.L.U** : $q_u = 1,35G + 1,5Q = 77,438$ kN/m²
- ✓ **E.L.S** : $q_{ser} = G + Q = 57,25$ kN/m²

V.4.4- Calcul des efforts :

Le calcul des efforts de la dalle se fait selon la méthode de calcul des dalles reposantes sur 4 côtés.

Calcul de "ρ :

$$\frac{L_x}{L_y} \geq 0,4 \Rightarrow \frac{1,8}{2} = 0,9$$

\Rightarrow La dalle travail dans les deux sens.

$$*M_x = \mu_x q_u L_x^2$$

$$*M_y = \mu_y M_x$$

$$\{\mu_x = 0,039 \Rightarrow M_x = 9,78 \text{ kNm}$$

$$\mu_y = 0,934 \Rightarrow M_y = 9,13 \text{ kNm}$$

Selon les conditions d'encastrement d'appuis, on obtient les moments suivants :

Moments en travées :

$$M_{tx} = 0,85 M_x = 8,31 \text{ kNm}$$

$$M_{ty} = 0,85 M_y = 7,76 \text{ kNm}$$

Moments sur appuis :

$$M_{ax} = 0,3 M_x = 2,93 \text{ kNm}$$

$$M_{ay} = 0,3 M_y = 2,74 \text{ kNm}$$

$$M_a = \text{Max} (M_{ax} ; M_{ay}) = 2,93 \text{ kNm}$$

V.4.5- Ferrailage de la dalle :

On a: $b = 100 \text{ cm}$; $h = 25 \text{ cm}$; $d = 0,9h = 22,5 \text{ cm}$; $c = 2 \text{ cm}$; $\sigma_{bc} = 14,17 \text{ MPa}$; $\sigma_s = 348 \text{ MPa}$

Tableau.V.9: Tableau récapitulatif des résultats de ferrailage :

		Mt (kNm)	μ	A's (cm ²)	α	β	Acals (cm ²)	Choix	Aadps (cm ²)
travée	Sens x-x	8,31	0,0115	0	0,0144	0,9942	1,06	5T8	2,51
	Sens y-y	7,76	0,0108	0	0,0135	0,9946	0,99	4T8	2,01
appui	Sens x-x	2,93	0,0041	0	0,0051	0,9979	0,37	3T8	1,51
	Sens y-y	2,74	0,0038	0	0,0047	0,9981	0,35	3T8	1,51

>Espacement :

- **En travée :**

$$St = \begin{cases} 100/5 = 20 \text{ cm} < \text{Min}(3h; 33 \text{ cm}) = 33 \text{ cm} (\text{sens } x - x) \dots\dots\dots \text{vérifiée} \\ 100/5 = 20 \text{ cm} < \text{Min}(4h; 45 \text{ cm}) = 45 \text{ cm} (\text{sens } y - y) \dots\dots\dots \text{vérifiée} \end{cases}$$

- **En appui :**

$$St = \begin{cases} 100/5 = 20 \text{ cm} < \text{Min}(3h; 33 \text{ cm}) = 33 \text{ cm} (\text{sens } x - x) \dots\dots\dots \text{vérifiée} \\ 100/5 = 20 \text{ cm} < \text{Min}(4h; 45 \text{ cm}) = 45 \text{ cm} (\text{sens } y - y) \dots\dots\dots \text{vérifiée} \end{cases}$$

➤ **Calcul des armatures transversales :**

Les armatures transversales ne sont pas nécessaires si la condition ci-dessous est vérifiée :

$$t_u = \frac{T_u^{max}}{bd}$$

$$T_X = \frac{q_u \times L_x \times L_y}{2 \times L_x + L_y} = 49,46 \text{ KN}$$

$$T_Y = \frac{q_u \times L_x}{3} = 46,78 \text{ KN}$$

$$t_u = \frac{49,78 \times 10^3}{1000 \times 225} = 0,221 \text{ MPa} < \bar{t}_u = 1,25 \text{ MPa} \dots \dots \dots \text{ vérifiée}$$

Les armatures transversales ne sont pas nécessaires.

V.4.6- Vérification :

V.4.6.1- Vérification des contraintes :

- **Béton :**

$$\sigma_b = \frac{M_{ser}}{I} y \leq \bar{\sigma}_{bc} = 0,6 f_{c28} = 15 \text{ MPa}$$

- **Acier :**

$$\sigma_s = \eta \frac{M_{ser}}{I} (d-y) \leq \bar{\sigma}_s$$

La fissuration est considérée comme préjudiciable.

$$\bar{\sigma}_s = \text{Min} (2/3 f_e; 150\eta) = 240 \text{ MPa}$$

Avec :

$$\eta = 1,6 \text{ pour HA ; } f_e = 500 \text{ MPa}$$

$$\rho = L_x / L_y = 0,97$$

$$M_x = \mu_x \times q_{ser} \times L_x^2$$

$$M_y = \mu_y \times M_x$$

$$\begin{cases} \mu_x = 0,046 \Rightarrow M_x = 8,53 \text{ kNm} \\ \mu_y = 0,961 \Rightarrow M_y = 8,20 \text{ kNm} \end{cases}$$

- **Moments en travées :**

$$M_{tx} = 0,85 M_x = 7,25 \text{ kNm}$$

$$M_{ty} = 0,85 M_y = 6,97 \text{ kNm}$$

- **Moments sur appuis :**

$$M_a = \text{Max} (0,3 M_x; 0,3 M_y) = 2,55 \text{ kNm}$$

➤ **Détermination de la valeur de « y » :**

$$b/2 y^2 + nA_s'(y-c') - nA_s(d-y) = 0 \quad \text{avec } n=15$$

• **Moment d'inertie :**

$$I = by^3/3 + nA_s'(d-c') + nA_s(d-y)^2$$

Les résultats trouvés en travée et sur appui dans les deux sens sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau.V.10: Vérification des contraintes de la dalle dans les deux sens.

		Mt (kNm)	As (cm ²)	Y (cm)	I (cm ⁴)	σbc(MPa)	σ _{bc} ≤ σ _{bc} ^{max}
Travée	(x-x)	7,25	2,51	3,75	14994,14	1,91	Vérifiée
	(y-y)	6,97	2,51	3,75	14994,14	1,84	Vérifiée
Appuis		2,55	2,51	3,75	14994,14	0,64	Vérifiée

V.4.6.2- Vérification de la condition de non fragilité :

h= 25cm ; b=100cm

$$\begin{cases} A_x \geq \rho_0 (3 - \rho) / 2 bh = 2,1\text{cm}^2 \\ A_y \geq \rho_0 bh = 2,00\text{cm}^2 \end{cases}$$

Avec :

$$\begin{cases} \rho_0 = 0,8 \text{ ‰ pour les barres à haute adhérence} \\ \rho = L_x/L_y = 0,90 \end{cases}$$

➤ **Sens Lx-x :**

- **Sur appuis :** Ax=2,51cm²/ml>2,03cm².....vérifiée
- **En travée :** Ax=2,51cm²/ml>2,03cm².....vérifiée

➤ **Sens Ly-y :**

- **Sur appuis :** Ay=2,51cm²/ml>2,00cm².....vérifiée
- **En travée :** Ax=2,51cm²/ml>2,00cm².....vérifiée

V.4.6.3- Vérification de la flèche :

La vérification de la flèche n'est pas nécessaire si les conditions suivantes sont vérifiées (**B.A.E.L.91modifié 99**) :

Avec :

$h=0.25\text{ m}$ $L= 1.9\text{ m}$.

$A_{stl}=2.51\text{cm}^2$

- ✓ $h/I \geq 1/160.131 > 0.062$ c.v
- ✓ $h \geq (1/10) \times (M_t/M_0)0.131 > 0.084$ c.v
- ✓ $A_{sapp}/bd \leq 4,2 /f_e 0.0011 < 0.010$c.v

V.4.7- Schéma de ferrailage de la dalle machine

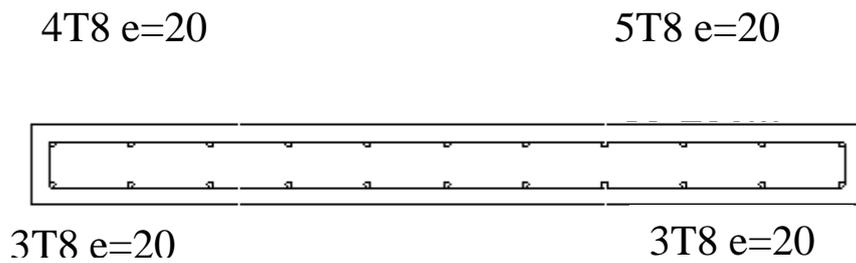


Figure V.12: Schéma de ferrailage de la dalle machine

Chapitre VI



Etude dynamique

Etude dynamique

VI.1- Introduction

Les tremblements de terre ont présenté depuis toujours un des plus graves désastres pour l'humanité. Leur apparition brusque et surtout imprévue, la violence des forces mises en jeu, l'énormité des pertes humaines et matérielles ont marqué la mémoire des générations. Parfois, les dommages sont comparables à un budget national annuel pour un pays, surtout si ses ressources sont limitées.

Une catastrophe sismique peut engendrer une grave crise économique, ou au moins une brusque diminution du niveau de vie dans toute une région pendant une longue période.

L'une des questions qui se posent est : Comment limiter les endommagements causés aux constructions par le séisme ?

Il est donc nécessaire de construire des structures résistant aux séismes en zone sismique

La présente étude est faite en modélisant la structure en tridimensionnel 3D avec le logiciel **ETABS 2009**.

VI.2- Objectif de l'étude dynamique

L'objectif initial d'étude dynamique d'une structure est la détermination des caractéristiques dynamiques propres de la structure lors de Vibrations libre non amortie (V.L.N.A).

L'étude dynamique d'une structure telle qu'elle se présente, est souvent très complexe à cause du nombre de fonctions et éléments existants dans une structure. C'est pour cela qu'on fait souvent appel à des modélisations qui permettent de simplifier suffisamment le problème pour pouvoir l'analyser.

La présente étude est faite en modélisant la structure en tridimensionnel 3D avec le logiciel **ETABS 2009**.

VI.3- Présentation de logiciel l'ETABS

L'**ETABS** est un programme structural basé sur la méthode des éléments finis autonome pour l'analyse et la conception des structures civiles .il offre une interface utilisateurs intuitive portant puissante avec beaucoup d'outils pour faciliter la construction rapide et précise des modèles avec les techniques analytique sophistiquées requise pour faire les projets les plus complexes

Nom du programme:(Extented 3d analyses of building systèmes), Ce dernier est un logiciel qui permet de modéliser et d'analyser les bâtiments., les caractéristiques principales d'**ETABS** sont:

- **L'ETABS** est un logiciel de calcul conçu exclusivement pour le calcul des bâtiments grâce à une interface graphique unique. Il offre des nombreuses possibilités pour l'analyse statique et dynamique Q.
- Ce logiciel permet la prise en compte des propriétés non linière des matériaux ainsi que le calcul et le dimensionnement des éléments structuraux suivant différant es réglementation en vigueur à travers le monde de plus de par sa spécificité pour le calcul des bâtiments; l'**ETABS** offre un avantage certain par rapport au codes de calcul à utilisation plus étendue. En effet grâce à ces diverses fonction il permet une descente de charges automatique et rapide ; un calcul automatique du centre de masse et de rigidité. Ainsi que la prise en compte implicite d'une éventuelle excentricité accidentelle. De plus, ce logiciel utilise une terminologie propre au domaine du bâtiment (plancher, dalle, trumeau, linteau . . etc)
 - **L'ETABS** permet également le transfert de donnée avec d'autres logiciels
 - Modélisation mathématique par la méthode des élément finis

VI.4- Modélisation :

VI.4.1- Modélisation mathématique par la méthode des éléments finis

La modélisation revient à représenter un problème physique possédant un nombre infini de degré de liberté (DDL) par un modèle ayant un nombre fini de DDL, et qui reflète avec une bonne précision les paramètres du système d'origine à savoir : la masse, la rigidité et l'amortissement [5] .

En d'autres termes ; La modélisation est la recherche d'un mécanisme simplifié qui nous rapproche le plus possible du comportement réel de la structure, en tenant compte le plus correctement possible de la masse et de la rigidité de tous les éléments de la structure.

VI.4.2- Détermination des fréquences et modes propres

Une structure classique idéale est dépourvue de tout amortissement de sorte qu'elle peut vibrer indéfiniment sans qu'il soit nécessaire de lui fournir de l'énergie. Ce comportement est purement théorique en raison de l'existence inévitable des frottements qui amortissent le mouvement.

L'équation du mouvement d'un système se déplaçant librement sans amortissement s'écrit :

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \dots\dots\dots (1)$$

Où :

$\{\ddot{x}\}, \{x\}$: représentent respectivement le vecteur des accélérations et le vecteur des déplacements de la structure.

$[M]$: représente la matrice masse de la structure.

$[K]$: représente la matrice de rigidité de la structure.

L'analyse d'un système à plusieurs degrés de liberté en vibrations libres non amorties (VLNA), nous fournit les propriétés dynamiques les plus importantes de ce système, qui sont les fréquences propres et modes propres.

Dans chaque mode propre de vibration, chaque point de la structure exécute un mouvement harmonique autour de sa position d'équilibre. Ce qui peut s'écrire :

$$\{x(t)\} = \{A\}\sin(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots (2)$$

Avec :

$\{A\}$: Vecteur des amplitudes.

ω : Fréquence de vibration.

φ : Angle de déphasage.

Les accélérations en VLNA sont alors données par :

$$\{\ddot{x}(t)\} = -\omega^2\{A\}\sin(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots (3)$$

En reportant les équations (2) et (3) dans l'équation (1), on aura :

$$[[K] - \omega^2[M]]\{A\}\sin(\omega t + \varphi) = \{0\} \dots\dots\dots (4)$$

Cette équation doit être vérifiée quelque soit le temps (t), donc pour toutes les valeurs de la fonction sinus, ce qui donne :

$$[[K] - \omega^2[M]]\{A\} = \{0\} \dots\dots\dots (5)$$

Ce système d'équation est un système à (N) inconnues A_i . C'est un système d'équation homogène qui ne peut admettre de solution non nulle que si le déterminant de la matrice carrée s'annule.

D'où :

$$\det[[K] - \omega^2[M]] = 0 \dots\dots\dots (6)$$

L'expression ci-dessus est appelée " *Equation caractéristique* ".

En développant l'équation caractéristique, on obtient une équation polynomiale de degré (2N) en (ω).

Les N solutions ($\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2$) sont les carrés des pulsations propres des N modes des vibrations possibles.

Le 1^{er} mode vibratoire correspond à ω_1 et est appelé le mode fondamental ($\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$).

A chaque pulsation propre, correspond une forme d'oscillation appelée mode propre $\{\mathbf{A}\}_j$ ou forme modale.

Lors d'une analyse dynamique d'une structure, il est indispensable de trouver la modélisation adéquate de cette dernière. Le bâtiment étudié présente des irrégularités dans son plan.

Par ailleurs, vu la complexité et le volume de calcul que requiert l'analyse du bâtiment, l'utilisation de l'outil informatique et s'impose.

VI.4.3- Modélisation de la rigidité :

La modélisation des éléments constituant le contreventement (rigidité) est d'effectué comme suit :

- Les voiles sont modélisés par des éléments " Shell "à plusieurs nœuds (rectangulaire).

VI.4.4- Modélisation de la masse :

- La masse volumique attribuée au matériau constituant les poteaux et les poutres est prise égale à celle du béton armé à savoir $2,5t/m^3$.
- La masse de l'acrotère et des murs extérieurs (maçonnerie) a été répartie linéairement aux niveaux des poutres principales correspondants à leur emplacement.

VI.4.5- Caractéristiques géométriques et massiques de la structure :

La détermination du centre de masse est basée sur le calcul des centres de masse de chaque élément de la structure (acrotère, poteaux, poutres, planchers, escaliers, voiles, maçonneries et balcons).

Les coordonnées du centre de masse sont données par :

$$X_G = \frac{\sum M_i X_i}{\sum M_i} \quad \text{et} \quad Y_G = \frac{\sum M_i Y_i}{\sum M_i}$$

Avec :

M_i : La masse de l'élément " i " du niveau considéré.

X_i, Y_i : Coordonnées du centre de gravité de l'élément " i " par rapport au repère global.

VI.5- Etude sismique :

VI.5.1- Introduction :

Notre structure étant implantée en zone sismique III et vu les dégâts énormes que peut engendrer un séisme, une étude sismique s'impose. Ainsi, le calcul d'un bâtiment vis à vis du séisme repose sur l'évaluation des charges susceptibles d'être engendrées dans le système structural lors du séisme. Dans le cadre de notre projet, la détermination de ces efforts est conduite par le logiciel **ETABS** qui utilise une approche dynamique basée sur le principe de la superposition modale.

VI.5.2- Choix de la méthode de calcul :

En Algérie, la conception parasismique des structures est régie par un règlement en vigueur à savoir le (RPA ,1999). Ce dernier propose trois méthodes de calcul dont les conditions d'application différent et cela selon le type de structure à étudier, ces méthodes sont les suivantes :

- 1- La méthode statique équivalente.
- 2- La méthode d'analyse modale spectrale.
- 3- La méthode d'analyse dynamique par accélérogramme.

Selon le (RPA ,1999) La méthode statique équivalente n'est pas applicable dans le cas du bâtiment étudié, nous utiliserons la méthode d'analyse modale spectrale pour l'analyse sismique ; vu que cette dernière d'après le règlement peut être utilisée dans tous les cas et en particulier, dans le cas où la méthode statique équivalente n'est pas permise.

VI.6- Méthode dynamique modale spectrale

VI.6.1- Principe de la méthode

Par cette méthode, il est recherché pour chaque mode de vibration, le maximum des effets engendrés dans la structure par les forces sismiques représentées par un spectre de réponse de calcul. Ces effets sont par la suite combinés pour obtenir la réponse de la structure.

VI.6.2- Modélisation

La modélisation se fait à l'aide de logiciel ETABS est un logiciel presque identique au (SAP, 2000) sauf qu'il est spécial bâtiment, Pour cela, le model choisi prend en considération les éléments de la structure selon le concept suivant :

- Les poutres, les poteaux seront modélisées par des barres 'FRAME'
- Les voiles sont modélisées par des éléments 'SHELL'
- Les planchers autant une rigidité infinie dans leur plan, cela se fait en leur assignant un élément 'DIAPHRAGME'
- La masse de chaque étage est prise concentrée au niveau du centre de gravité du plancher.

VI.6.3- Le spectre de réponse de calcul

L'action sismique est représentée par le spectre de calcul suivant :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1,25A(1 + \frac{T}{T_1}(2,5\eta \frac{Q}{R} - 1)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5\eta(1,25A)(\frac{Q}{R}) & T_2 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta(1,25A)(\frac{Q}{R})(\frac{T_2}{T})^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq T \leq 3,0 \text{ s} \\ 2,5\eta(1,25A)(\frac{Q}{R})(\frac{T_2}{3})^{\frac{2}{3}}(\frac{3}{T})^{\frac{5}{3}} & T \geq 3,0 \text{ s} \end{cases}$$

Avec :

- A : Coefficient d'accélération de la zone
- η : Facteur de correction d'amortissement :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi}} \geq 0.7$$

- ξ : pourcentage d'amortissement critique
- T_1, T_2 : périodes caractéristiques associées à la catégorie de site

Tableau VI.1 : Valeur de T_1 et T_2

Site	S1	S2	S3	S4
T₁ (sec)	0,15	0,15	0,15	0,15
T₂ (sec)	0,30	0,40	0,50	0,70

- R : Coefficient de comportement de la structure
- Q : Facteur de qualité Le facteur de qualité est égal à 1 additionné à la somme de pénalités selon que les critères de qualité sont satisfaits ou non :

$$Q = 1 + \sum_{1}^{5} P_q$$

Ces pénalités sont rappelées dans le tableau (tableau IV.2) suivant :

Tableau VI.2 : Détermination du facteur de qualité Q de la structure

	Critère	Suivant X		Suivant Y	
		Observé	Valeur	Observé	Valeur
1	Condition minimales sur les files de contreventement	oui	0	oui	0
2	Redondance en plan	Non	0.05	Non	0.05
3	Régularité en plan	Oui	0	Non	0
4	Régularité en élévation	Oui	0	Oui	0
5	Contrôle de la qualité des matériaux	Non	0,05	Non	0,05
6	Contrôle de la qualité de l'exécution	Non	oui	Oui	0,1

Le spectre de réponse de notre structure est donnée par la **Figure VI.1** suivant :

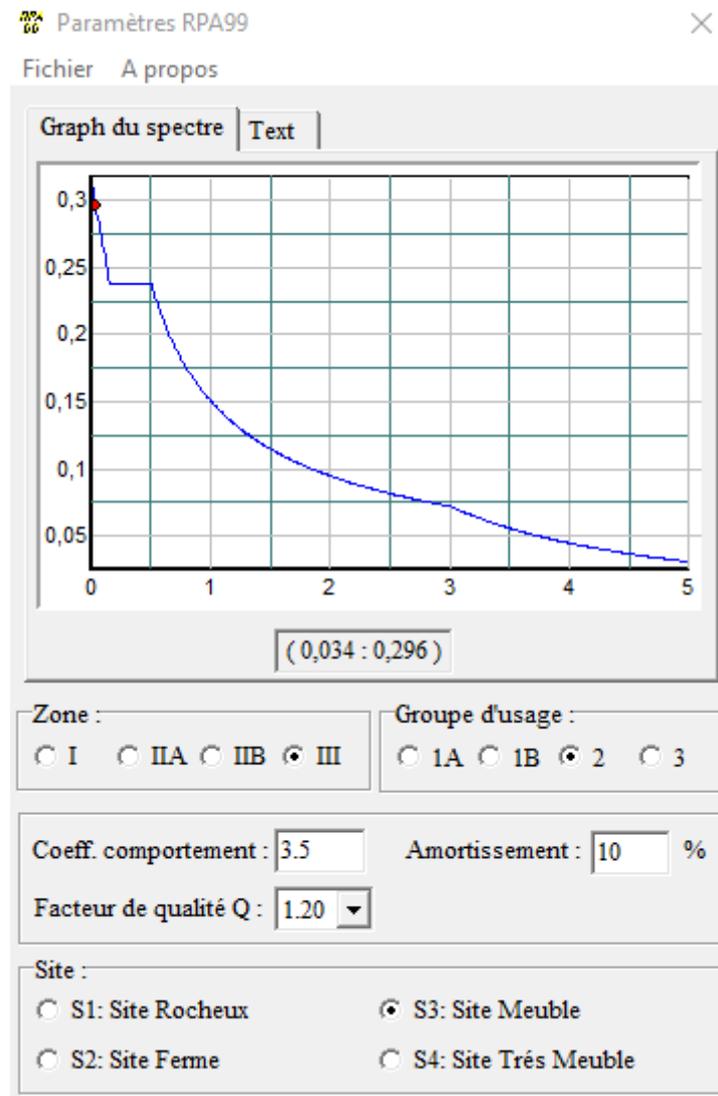


Figure VI.1 : Spectre de réponse.

Pour notre structure on a :

Zone	G d'usage	A	R	T ₁	T ₂	Q	ξ	η	Q
III	2	0,25	3,5	0,15	0,50	1,2	10	0,764	1,2

VI.7- Calcul de la force sismique par la méthode statique équivalente :

soit :

$$V = \frac{A D Q}{R} W$$

avec :

A ,Q et R sont indiqués à la page précédente

W : poids de la structure, il est calculé de manière automatique :

$$\Rightarrow W = 44798.4 \text{ KN}$$

D : Facteur d'amplification dynamique moyen, il est en fonction de la catégorie du site, du facteur de correction d'amortissement η et de la période T de la structure.

- la période de la structure

La valeur de la période fondamentale (T) de la structure peut être estimée à partir de formules empiriques ou calculées par des méthodes analytiques ou numériques.

Les formules empiriques à utiliser selon le **RPA99/version 2003** sont :

$$T = \min \begin{cases} T = 0.09 \frac{h_N}{\sqrt{L_{x,y}}} \\ T = C_T \times h_N^{3/4} \end{cases}$$

$$C_T = 0,05$$

h_N : Hauteur mesurée en mètre à partir de la structure jusqu'au dernier niveau.

$$\Rightarrow h_N = 33.66 \text{ m}$$

$L_{x,y}$: est la dimension du bâtiment mesurée à sa base dans la direction de calcul considéré

$$\Rightarrow L_x = 32.86 \text{ m}$$

$$\Rightarrow L_y = 17.55 \text{ m}$$

Suivant X

$$T = \min \begin{cases} T = 0.09 \frac{33.66}{\sqrt{32.86}} = 0.528 \text{ s} \\ T = 0.05 \times 33.66^{3/4} = 0.698 \text{ s} \end{cases}$$

Suivant Y

$$T = \min \begin{cases} T = 0.09 \frac{33.66}{\sqrt{17.55}} = 0.723 \text{ s} \\ T = 0.05 \times 33.66^{3/4} = 0.698 \text{ s} \end{cases}$$

Donc on prend :

$$\begin{cases} T_x = 0.528 \text{ s} \\ T_y = 0.698 \text{ s} \end{cases}$$

- facteur de correction d'amortissement η

$$\eta = 0.764$$

$$D = \begin{cases} 2.5\eta & 0 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta\left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0\text{s} \\ 2.5\eta\left(\frac{T_2}{3.0}\right)^{2/3}\left(\frac{3.0}{T}\right)^{5/3} & T \geq 3.0\text{s} \end{cases}$$

Or

$$T_2 \leq T_x \text{ et } T_y \leq 3.0\text{s} \rightarrow D = 2.5\eta\left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3}$$

$$\begin{cases} D_x = 2.5 \times 0.764 \left(\frac{0.50}{0.528}\right)^{2/3} = 1.841 \\ D_y = 2.5 \times 0.764 \left(\frac{0.50}{0.698}\right)^{2/3} = 1.529 \end{cases}$$

Donc la force sismique est égal à:

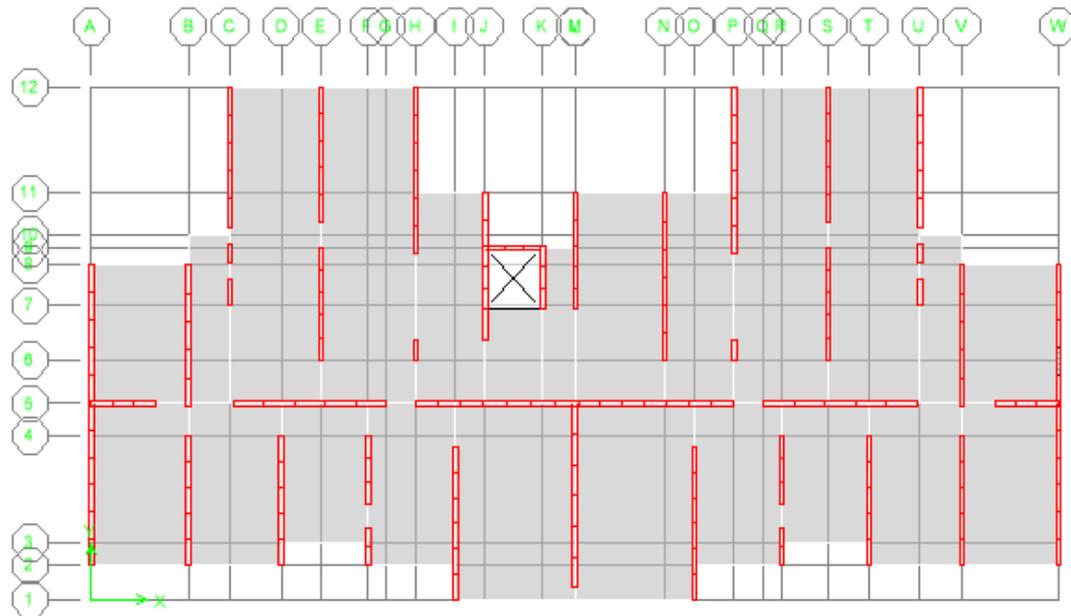
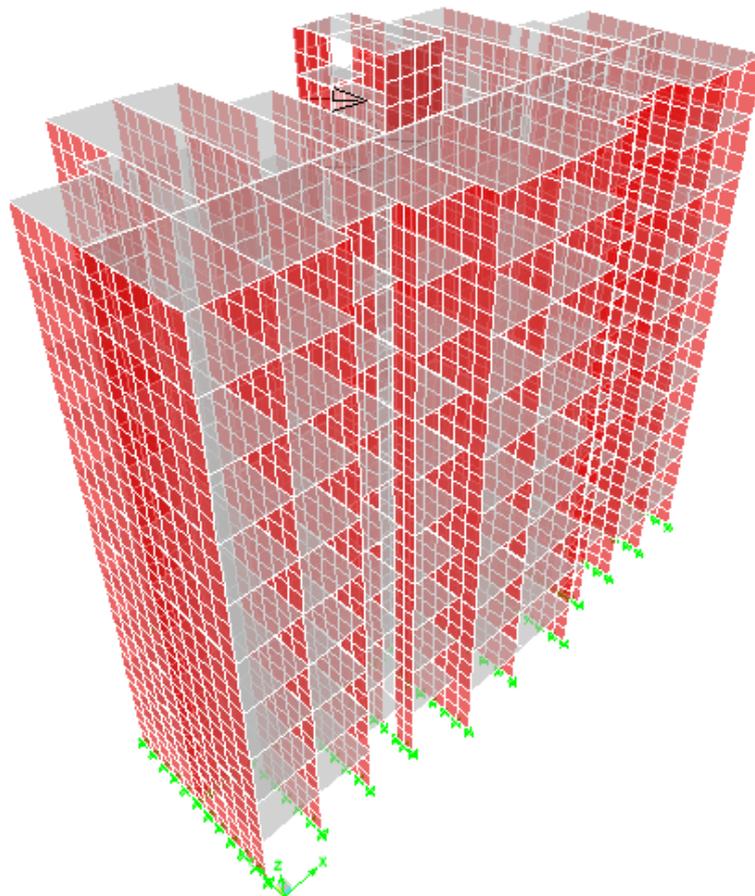
$$\begin{cases} V_x = \frac{A \times D(x) \times Q}{R} \times W = \frac{0.25 \times 1.841 \times 1.2}{3.5} \times 44798.4 = 7069.19 \text{ KN} \\ V_y = \frac{A \times D(y) \times Q}{R} \times W = \frac{0.25 \times 1.529 \times 1.2}{3.5} \times 44798.4 = 5871.15 \text{ KN} \end{cases}$$

VI.8- Résultante des forces sismiques de calcul

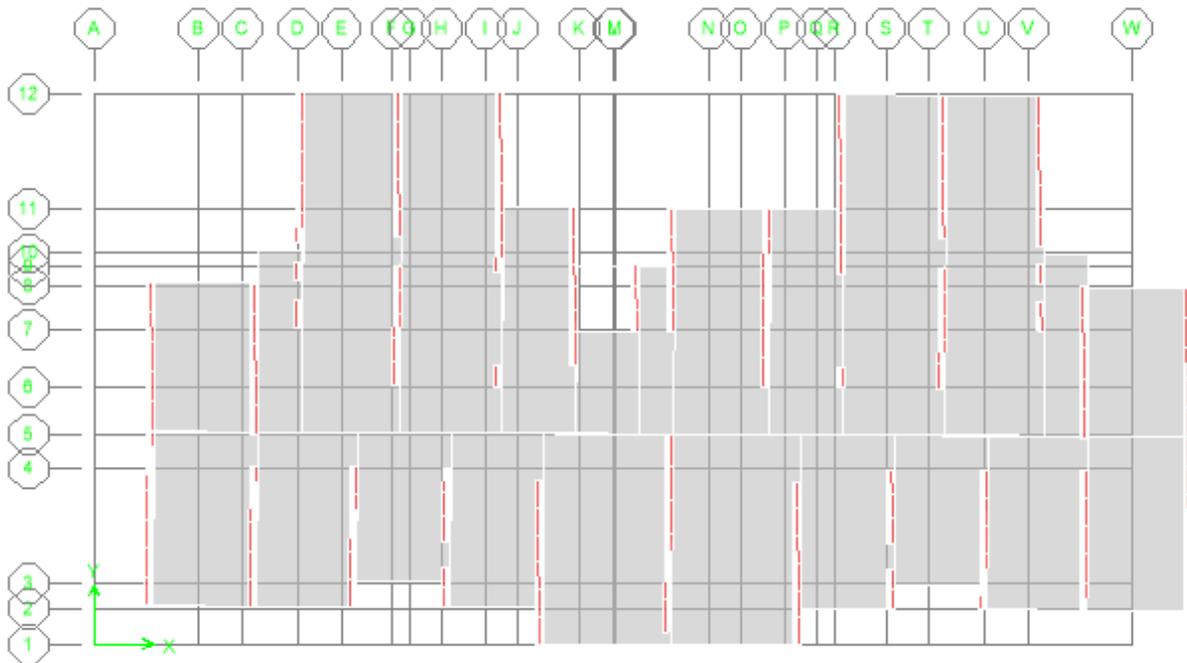
La résultante des forces sismiques à la base V_t obtenue par combinaison des valeurs modales ne doit pas être inférieure à 80% de la résultante des forces sismiques déterminée par la méthode statique équivalente V pour une valeur de la période fondamentale donnée par la formule empirique appropriée

Si $V_t < 0,8V$, il faudra augmenter tous les paramètres de la réponse (forces, déplacement, moments...) dans le rapport :

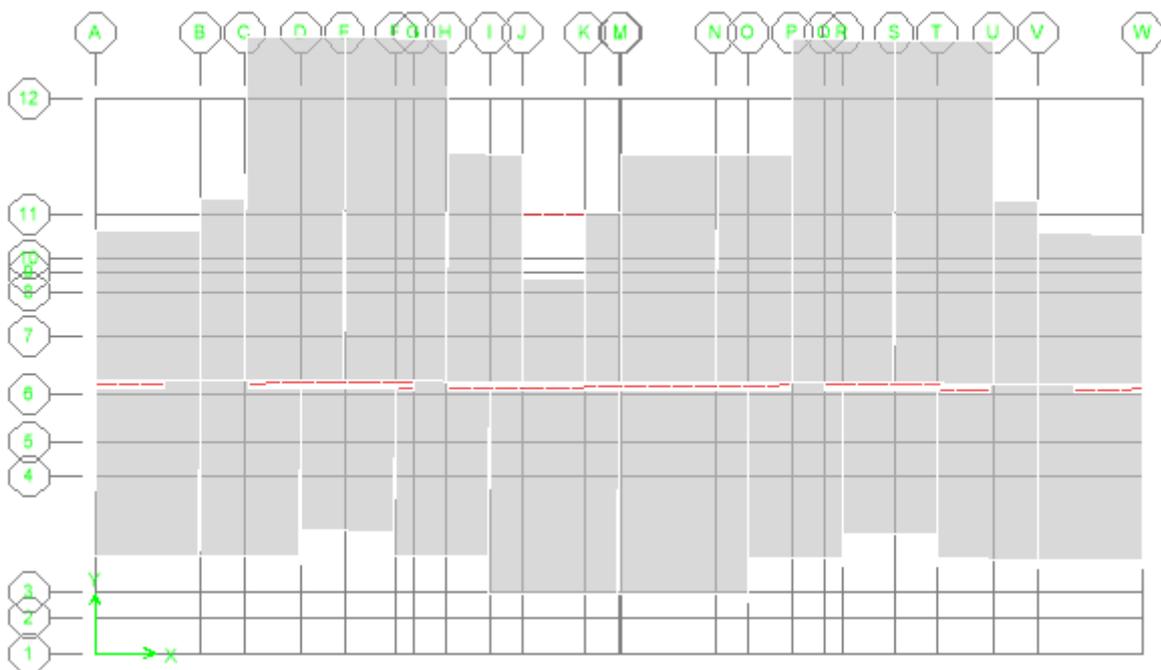
$$r = 0,8V/V_t$$

VI.9- Résultats de l'analyse dynamique du modèle**Figure.VI.2 :** Vue en plan de la structure sur ETABS.**Figure.VI.3 :** Image 3D de la structure sur ETABS.

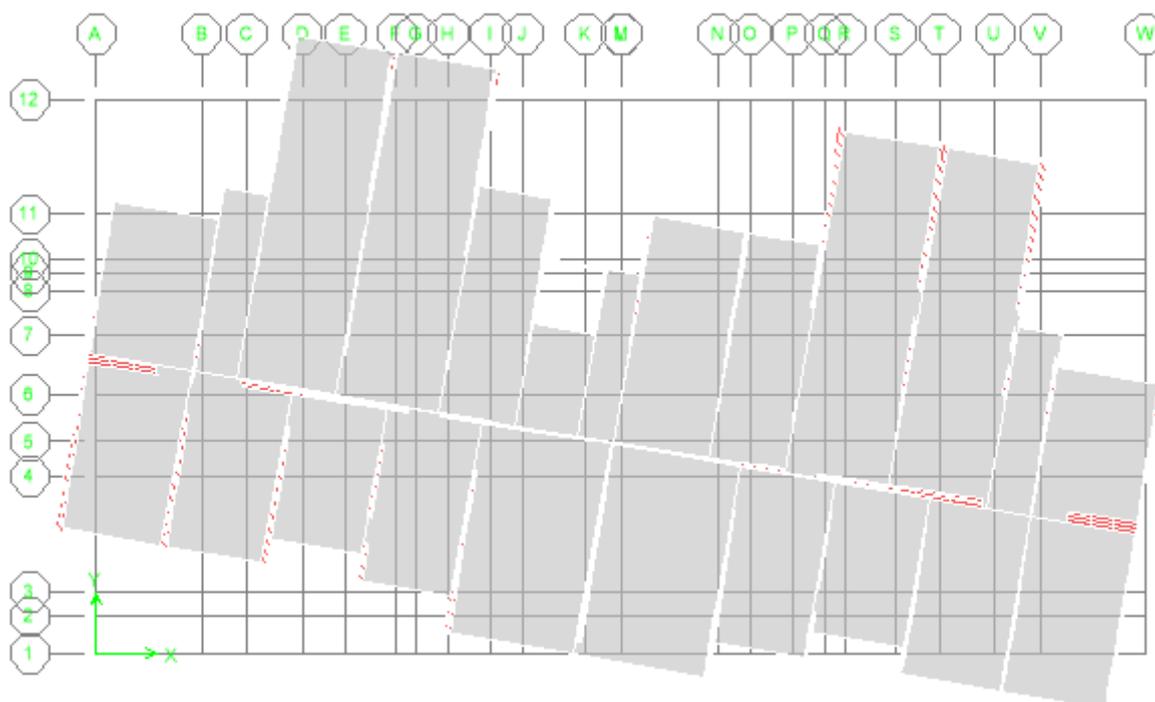
VI.9.1- Caractéristiques dynamiques propres du modèle.



Mode 1 : Translation suivant x



Mode 2 : Translation suivant y



Mode 3 : translation

Tableau VI.3 : Période et facteurs de participation massique du modèle.

Mode	Period	UX	UY	ΣUX	ΣUY
1	0,887	65,854	0,000	65,854	0,000
2	0,504	0,000	65,447	65,855	65,447
3	0,445	0,058	0,039	65,914	65,486
4	0,170	21,226	0,000	87,140	65,486
5	0,093	0,000	20,766	87,140	86,252
6	0,084	0,025	0,033	87,165	86,286
7	0,073	6,605	0,000	93,771	86,286
8	0,045	2,493	0,171	96,265	86,457
9	0,042	0,520	1,846	96,785	88,304
10	0,037	0,075	4,573	96,860	92,877
11	0,036	0,005	0,255	96,865	93,132
12	0,032	1,302	0,165	98,167	93,297

➤ **Constatations :**

L'analyse dynamique de la structure à conduit à :

- une période fondamentale : $T=0,887s$
- verification de la periode dont :

$$T_{ETABS} = 0,887s \leq 1,3 \times T_{RPA} = 0,907s$$

▪ Centre de rigidité

C'est le point passage de la ligne d'application V_i , telle que la rotation relative de deux planchers successifs (i et $i+1$), sera nulle. Cette ligne définit la position du "centre de rigidité (CRi) des éléments structuraux verticaux du niveau i .

La position du centre de rigidité (CRi) du niveau i dépend des raideurs des éléments structuraux verticaux (colonnes, voiles, noyaux) du même niveau ainsi que les raideurs les éléments structuraux horizontaux du niveau $i+1$, forment des portiques avec les éléments structuraux verticaux du niveau i ,

de sorte qu'en fait c'est la raideur de ces portiques qui définit la position du centre de rigidité (CRi). Sa détermination exacte est difficile, c'est pourquoi l'analyse automatique par le logiciel ETABS est indispensable afin de faciliter cette opération comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau VI.4 : Caractéristiques massiques et géométriques

Story	Position de centre de masse		Position de centre de rigidité	
	XCM	YCM	XCR	YCR
ET 10	14,859	9,553	14,452	8,099
ET 9	16,433	8,05	16,466	7,163
ET 8	16,418	8,03	16,466	7,162
ET 7	16,418	8,03	16,466	7,161
ET 6	16,418	8,03	16,466	7,16
ET 5	16,418	8,03	16,467	7,158
ET 4	16,418	8,03	16,467	7,154
ET 3	16,418	8,03	16,468	7,148
ET 2	16,418	8,03	16,468	7,137
ET 1	16,418	8,03	16,467	7,114
RDC	16,406	7,981	16,456	7,097

VI.9.3- Calcul et vérification des déplacements des planchers

C'est des déplacements horizontaux dus aux forces sismiques (δ_{ek}) de chaque niveau (k) suivant les deux sens (xx) et (yy), ils seront donnés par le logiciel, comme le montre le tableau ci-après :

Tableau VI.5 : Déplacement horizontal de chaque niveau

	δ_{ex} (mm)	δ_{ey} (mm)
RDC	0,393	0,166
1^{er}	0,893	0,394
2^{ème}	1,295	0,578
3^{ème}	1,621	0,727
4^{ème}	1,874	0,842
5^{ème}	2,063	0,927
6^{ème}	2,19	0,985
7^{ème}	2,264	1,019
8^{ème}	2,293	1,034
9^{ème}	2,294	1,036

▪ Calcul des déplacements latéraux inter étages

D'après l'article 4.4.3. du RPA99/2003, le déplacement horizontal de chaque niveau « k » de la structure est calculé comme suite :

$$\delta_k = R \times \delta_{ek}$$

δ_{ek} : déplacement dû aux forces sismiques F_i (y compris l'effet de torsion)

R : coefficient de comportement ($R = 3,5$)

Le déplacement relatif au niveau « k » par rapport au niveau « $k-1$ » est égale

$$\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1}$$

Après calcul nous obtiendront les résultats illustrés dans le tableau ci-après :

Tableau VI.6 : Déplacements latéraux inter étages

Etage	He (m)	Sens longitudinal (x-x)			Sens transversal (y-y)			vérification	
		δ_{ex} (mm)	$\Delta ex = \delta_{ex} - \delta_{ex-1}$ (mm)	$\Delta_x = R\Delta_{ex}$ (mm)	δ_{ey} (mm)	$\Delta ey = \delta_{ey} - \delta_{ey-1}$ (mm)	$\Delta_y = R\Delta_{ey}$ (mm)	$\bar{\Delta} = 0.01h_e$ (mm)	$\Delta_x \leq \bar{\Delta}$
RDC	3,06	0,393	0,393	1,376	0,166	0,166	0,581	30,6	oui
1 ^{er}	3,06	0,893	0,500	1,750	0,394	0,228	0,798	30,6	oui
2 ^{ème}	3,06	1,295	0,402	1,407	0,578	0,184	0,644	30,6	oui
3 ^{ème}	3,06	1,621	0,326	1,141	0,727	0,149	0,522	30,6	oui
4 ^{ème}	3,06	1,874	0,253	0,886	0,842	0,115	0,403	30,6	oui
5 ^{ème}	3,06	2,063	0,189	0,662	0,927	0,085	0,298	30,6	oui
6 ^{ème}	3,06	2,19	0,127	0,444	0,985	0,058	0,203	30,6	oui
7 ^{ème}	3,06	2,264	0,074	0,259	1,019	0,034	0,119	30,6	oui
8 ^{ème}	3,06	2,293	0,029	0,102	1,034	0,015	0,053	30,6	oui
9 ^{ème}	3,06	2,294	0,001	0,004	1,036	0,002	0,007	30,6	oui

VI.9.4- Justification vis-à-vis de l'effet P-Δ

L'effet P-Δ (P-delta) représente la tendance au renversement de la construction.

Son aggravation sollicite particulièrement et de façon croissante les éléments porteurs périphériques.

D'après l'article 5.9 du RPA99/2003, L'effet P-Δ peuvent être négligés dans le cas des bâtiments si la condition suivante est satisfaite à tous les niveaux :

$$\Theta = P_k \times \Delta_k / V_k \times h_k \leq 0,10$$

P_k : poids total de la structure et des charges d'exploitation associées au-dessus du niveau "k"

$$P_k = \sum_{i=k}^n W_{Gi} + \beta W_{Qi}$$

V_k : effort tranchant d'étage au niveau "k"

$$V_k = \sum_{i=k}^n F_i$$

Δ_k : déplacement relatif du niveau « k » par rapport au niveau « k-1 »

h_k : hauteur de l'étage « k ».

Les résultats des calculs sont illustrés dans le tableau ci-après :

Tableau VI.7 : Calcul du coefficient Θ

Etage	Pk	he	Sens longitudinal (x-x)			Sens transversal (yy)			vérification
			Vx	Δx	Θx	Vy	Δy	Θy	
RDC	62270,49	3,06	5694,99	1,376	6390,4	0,581	0,019	0,049	oui
1 ^{er}	56134,95	3,06	5520,45	1,750	6261,6	0,798	0,023	0,058	oui
2 ^{ème}	50135,27	3,06	5258,87	1,407	6037,22	0,644	0,017	0,044	oui
3 ^{ème}	44135,59	3,06	4932,34	1,141	5719,64	0,522	0,013	0,033	oui
4 ^{ème}	38135,91	3,06	4555,37	0,886	5316,58	0,403	0,009	0,024	oui
5 ^{ème}	32136,23	3,06	4132,24	0,662	4833,68	0,298	0,006	0,017	oui
6 ^{ème}	26136,54	3,06	3656,32	0,444	4263,93	0,203	0,004	0,010	oui
7 ^{ème}	20136,86	3,06	3104,18	0,259	3580,98	0,119	0,002	0,005	oui
8 ^{ème}	14137,18	3,06	2422,52	0,102	2736,33	0,053	0,001	0,002	oui
9 ^{ème}	8137,5	3,06	1496,35	0,004	1640,17	0,007	0,000	0,000	oui

VI.9.5- Vérification au renversement

Afin de s'assurer de la stabilité du bâtiment au renversement, il faut procéder à la vérification suivante :

$$\frac{M_{\text{stabilisateur}}}{M_{\text{renversant}}} \geq 1.5$$

- M_s : Moment stabilisant $\rightarrow M_s = W \times L/2$
- M_r : Moment de renversement $\rightarrow M_r = \sum F_i \times h_i$

Avec

W : Poids du bâtiment.

F : Force sismique au niveau i

Sens longitudinal x-x

W(KN)	Lx (m)	Ms (KN.m)	Mr (KN.m)	Ms/ Mr	vérification
44798.4	32.86	736037.712	146230.576	5.033405	oui

Sens transversal y-y

W(KN)	Lx (m)	Ms (KN.m)	Mr (KN.m)	Ms/ Mr	vérification
44798.4	17.55	393105.96	164159.238	2.39466243	oui

Chapitre VII



Férraillage des voiles

Ferraillage des voiles

VII.1- Introduction

Le voile est un élément structural de contreventement soumise à des forces verticales et des forces horizontales. Donc, le ferraillage des voiles consiste à déterminer les armatures en flexion composée sous l'action des sollicitations verticales dues aux charges permanentes (G) et aux surcharges d'exploitation (Q), ainsi que sous l'action des sollicitations horizontales dues aux séismes.

Donc les sollicitations engendrées dans les voiles sont

- Moment fléchissant et effort tranchant provoqués par l'action sismique
- Effort normal du à la combinaison des charges permanentes, d'exploitation et des charges sismiques

Pour faire face à ces sollicitations, on prévoit trois types d'armatures :

- Armatures verticales
- Armatures horizontales
- Armatures transversales

❖ Les combinaisons d'action :

Les combinaisons d'action sismiques et d'actions dues aux charges verticales à prendre sont données ci-dessous :

$$\text{Selon le BAEL 91} \quad \begin{cases} 1.35 G + 1.5 Q \\ G + Q \end{cases}$$

$$\text{Selon le RPA révisé 2003} \quad \begin{cases} G + Q \pm E \\ 0.8 G \pm E \end{cases}$$

Avec :

G : la charge permanente

Q : la charge d'exploitation

E : action au seisme

VII.2- Ferrailage des voiles

VII.2.1- Prescriptions imposées le RPA99

❖ Aciers verticaux :

Les armatures verticales doivent reprendre la totalité de l'effort de traction.

- Le pourcentage minimum des armatures verticales sur la zone tendue est de 0.20 %.
- Les barres verticales du dernier niveau doivent être munies de crochets à la partie supérieure.
- A chaque extrémité du voile l'espacement des barres doit être réduit de moitié sur (L/10) de largeur du voile. Cet espacement doit être au plus égal à 15cm.
- Le pourcentage minimum des armatures longitudinales des voiles dans chaque direction est pris comme suit :
 - En zone courante 0.1 %.
 - Globalement dans la section du voile 0.15 %.
- L'espacement minimum des barres horizontales et verticales doit être inférieur à la plus petite des deux valeurs suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} S \leq 1.5 a \\ S \leq 30 \text{ cm} \end{array} \right.$$

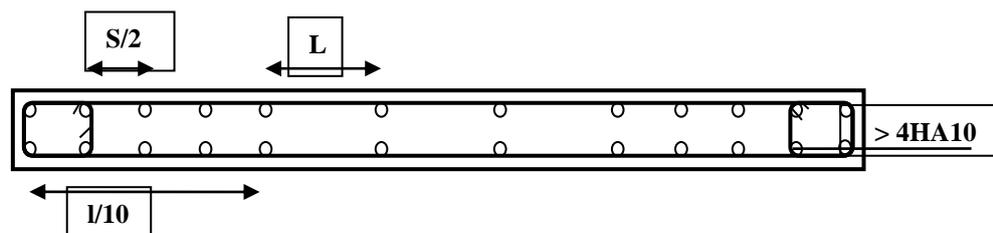


Figure VII-1 : Disposition des armatures verticales dans les voiles

❖ Aciers horizontaux :

Les armatures horizontales parallèles aux faces du mur doivent être disposées sur chacune des faces entre les armatures verticales et la paroi du coffrage et doivent être munies de crochets à (135°) ayant une longueur de 10Φ .

Ces armatures reprennent les sollicitations de l'effort tranchant.

❖ **Aciers transversaux :**

Les armatures transversales doivent respecter les dispositions suivantes :

L'espacement des barres verticales et horizontales doit être inférieur à la plus petite valeur des deux valeurs suivantes.

$$\begin{cases} S \leq 1.5.e \\ S \leq 30cm \end{cases} \quad \text{Article 7.7.4.3 RPA}$$

e : épaisseur du voile

- a) Les deux nappes d'armatures doivent être reliées avec au moins quatre épingles au mètre carré. Dans chaque nappe, les barres horizontales doivent être disposées vers l'extérieur.
- b) Le diamètre des barres verticales et horizontales des voiles (à l'exception des zones d'about) ne devrait pas dépasser $\frac{1}{10}$ de l'épaisseur du voile.
- c) Les longueurs de recouvrement doivent être égales à :
 - **40Φ** pour les barres situées dans les zones où le renversement du signe des efforts sont possibles.
 - **20Φ** pour les barres situées dans les zones comprimées sous l'action de toutes les combinaisons des charges possibles.

VII.2.2- Méthode de calcul :

La méthode utilisée est la méthode de RDM méthode des contraintes qui se fait pour une bande de largeur (d).

Pour le calcul de ferrailage on a partagé l'ouvrage en quatre (04) zones.

- Zone 1: sous sol ; niveau RDC et 1^{er} étage;
- Zone 2 : niveau 2^{ème} ; 3^{ème} et 4^{ème} étage ;
- Zone 3 : niveau 5^{ème} ; 6^{ème} et 7^{ème} étage ;
- Zone 4 : niveau 8^{ème} et 9^{ème} étage.

VII.2.3- Exposé de la méthode :

La méthode consiste à déterminer le diagramme des contraintes à partir des sollicitations les plus défavorables (N, M) en utilisant les formules suivantes :

VII.2.3.1- Détermination des contraintes :

$$\sigma_{max} = \frac{N}{B} + \frac{M \times V'}{I}$$

$$\sigma_{min} = \frac{N}{B} - \frac{M \times V'}{I}$$

Avec :

B : section du béton

I : moment d'inertie du trumeau

V et V' : bras de levier ; $V = V' = \frac{L_{voile}}{2}$

Calcul de la longueur tendue L_t

$$L_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max} + \sigma_{min}} \times L$$

L_c : longueur comprimé : $L_c = L - L_t$

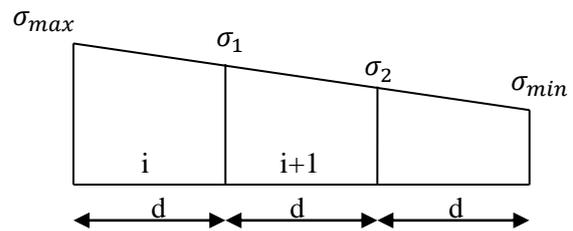
Les efforts normaux dans les différentes sections sont donnés en fonction des Diagrammes des contraintes obtenues :

- **Section entièrement comprimée :**

$$F_i = \frac{\sigma_{max} + \sigma_1}{2} \times d \times e$$

Avec :

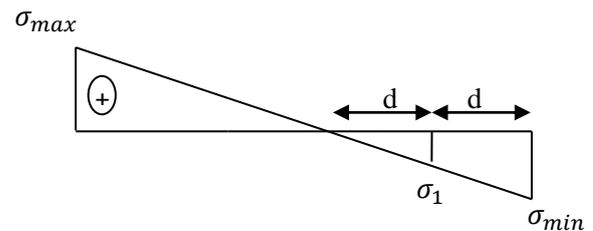
e : épaisseur du voile



- **Section partiellement comprimée :**

$$F_i = \frac{\sigma_{max} + \sigma_1}{2} \times d \times e$$

$$F_{i+1} = \frac{\sigma_1}{2} \times d \times e$$

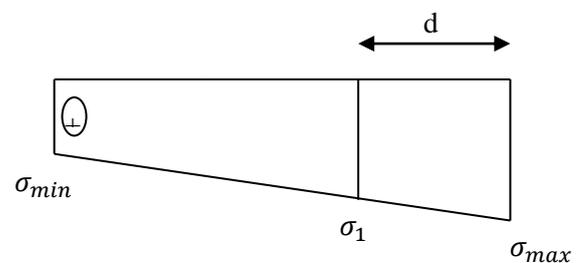


- **Section entièrement tendue :**

$$F_i = \frac{\sigma_{max} + \sigma_1}{2} \times d \times e$$

Tell que :

$$d \leq \min\left(\frac{h_e}{2}; \frac{2}{3}L_c\right)$$



VII.2.3.2- Armatures verticales :

- **Section entièrement comprimée :**

$$A_V = \frac{F_i + B \times f_{c28}}{f_e}$$

B : section de voile

- **Section partiellement comprimée**

$$A_V = \frac{F_i}{f_e}$$

- **Section entièrement tendue :**

$$A_V = \frac{F_i}{f_e}$$

VII.2.3.3- Armatures de coutures :

le long des joints de reprise de coulage, l'effort tranchant doit être reprise par les aciers de coutures dont la section est donnée par la formule :

$$A_{Vj} = 1,1 \frac{\bar{V}}{f_e}$$

Avec : $\bar{V} = 1,4 \times V$

V : Effort tranchant calculé au niveau considéré.

VII.2.3.4- Armatures minimales :

- **Compression du béton :**

$A_{min} \geq 4 \text{ cm}^2$ par mètre de parement mesuré perpendiculaire à ces armatures.

$$0,2 \% \leq \frac{A_{min}}{B} \leq 0,5 \%$$

Avec B : section du béton comprimée

- **Traction simple :**

$$A_{min} \geq \frac{B \times f_{c8}}{f_e}$$

Avec :

B : section du béton tendue

le pourcentage minimum des armatures verticales de la zone tendue doit rester au moins égale à 0.2 % de la section horizontale du béton tendu.

VII.2.3.5- Armatures horizontales :

les barres horizontales doivent être munies de crochets à 135° ayant une longueur de 10Φ .

D'après le BAEL 91 : $A_H = \frac{A_V}{4}$

D'après le RPA 2003 : $A_H \geq 0,5 \% \times B$

Les barres horizontales doivent être disposées vers l'extérieur.

Le diamètre des barres verticales et horizontales des voiles ne devrait pas dépasser $\frac{1}{10}$ de l'épaisseur du voile.

VII.2.3.6- Armatures transversales :

Les armatures transversales sont perpendiculaires aux faces des refends.

Elles retiennent les deux nappes d'armatures verticales, ce sont généralement des épingles dont le rôle est d'empêcher le flambement des aciers verticaux sous l'action de la compression d'après l'article 7.7.4.3 du RPA 99 révisé 2003.

Les deux nappes d'armatures verticales doivent être reliées au moins par (04) épingles au mètre carré.

Cette quantité doit s'ajouter à la section d'acier tendue nécessaire pour équilibrer les efforts de traction dus au moment de renversement.

VII.2.3.7- Espacement :

D'après l'article 7.7.4.3 du RPA révisé 2003, l'espacement des barres horizontales et verticales doit être inférieur à la plus petite des deux valeurs suivantes :

$$\begin{cases} St \leq 1,5 \times e \\ St \leq 30 \text{ cm} \end{cases}$$

$$St \leq \min\{22,5 \text{ cm} ; 30 \text{ cm}\} \Rightarrow St \leq 22,5 \text{ cm}$$

Avec :

e = l'épaisseur du voile

A chaque extrémité du voile l'espacement des barres doit être réduit de moitié sur $\frac{1}{10}$ de la longueur du voile, cet espacement d'extrémité doit être au plus égale à 15 cm.

VII.3- Vérification :

VII.3.1- Vérification à L'ELS :

Pour cet état, il considère :

$$N_{ser} = G + Q$$

$$\sigma_b = \frac{N}{B + 15 \times A} \leq \bar{\sigma}_b$$

$$\bar{\sigma}_b = 0,6 \times f_{c28}$$

Avec :

N_{ser} : effort normal appliqué

B : section du béton

A : section d'armature adoptée

VII.3.2- Vérification de la contrainte de cisaillement :

- **D'après le RPA révisé 2003 :**

$$\tau_b \leq \bar{\tau}_b = 0,2 \times f_{c28}$$

$$\tau_b = \frac{V}{b_0 \times d}$$

$$V = 1,4 \times V_{u,calcul}$$

Avec :

b_0 : Epaisseur du linteau ou du voile

d : Hauteur utile ($d = 0,9 h$)

h : Hauteur totale de la section brute

- **D'après le BAEL 91 :**

Il faut vérifier que :

$$\tau_u \leq \bar{\tau}_u$$

$$\tau_u = \frac{V_u}{b \times d}$$

Avec :

τ_u : contrainte de cisaillement

$$\tau_u = \min \left(0,15 \frac{f_{cj}}{\gamma_b}, 4MPa \right) ; \text{ Pour la fissuration préjudiciable.}$$

Disposition des voiles pour notre structure

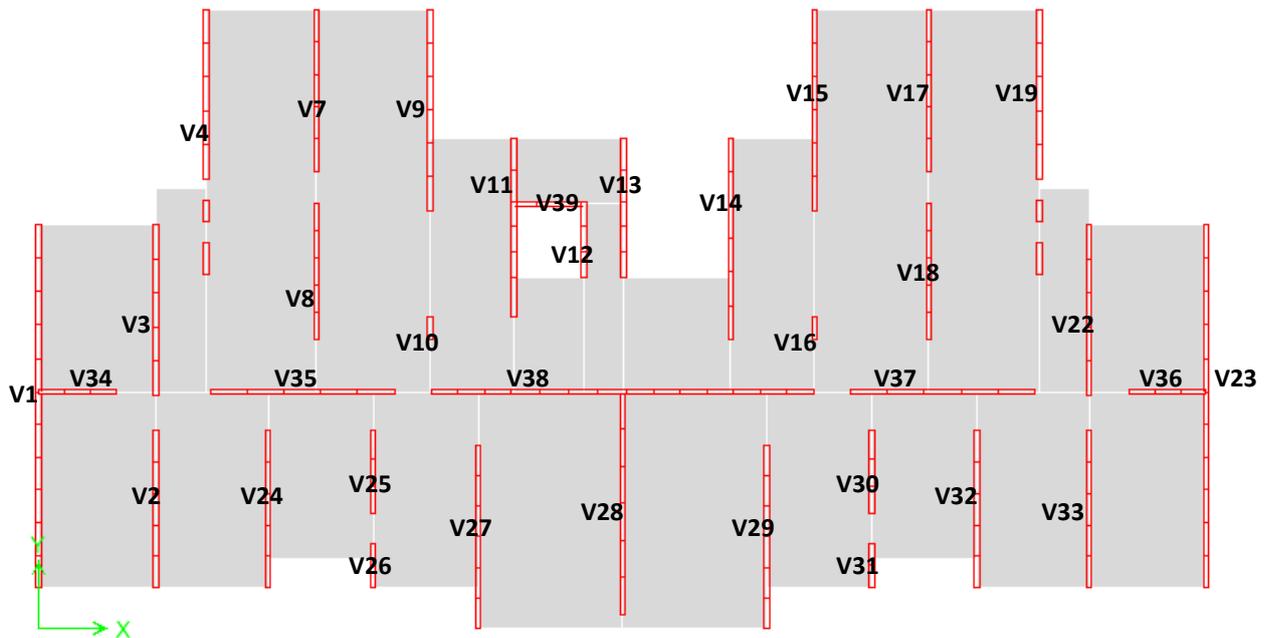


Figure VII-2 : Schéma de disposition des voiles

VII.4- Exemple de calcul : (zone I) voile

Nous prenons comme exemple de calcul le voile V(27; 29) ($L = 5,2$ m) dans la première zone. Ainsi le ferrailage sera calculé pour la longueur tendue du voile la partie restante sera ferrailer par symétrie.

Soit à calculer le ferrailage du voile longitudinal

$$L = 5,2 \text{ m} ; e = 15 \text{ cm}$$

$$I = 1,75 \text{ m}^4 ; V = V' = L / 2 = 2,6 \text{ m}$$

$$B = 0,78 \text{ m}^2$$

N et M sont donnés par l'ETABS

$$M = 424,81 \text{ t.m}$$

$$N = -187,98 \text{ t}$$

$$\sigma_1 = \frac{N}{B} + \frac{M \times V}{I} = \frac{-187,98}{0,78} + \frac{424,81 \times 2,6}{1,75} = 390,40 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma_2 = \frac{N}{B} - \frac{M \times V}{I} = \frac{-187,98}{0,78} - \frac{424,81 \times 2,6}{1,75} = -872,15 \text{ t/m}^2$$

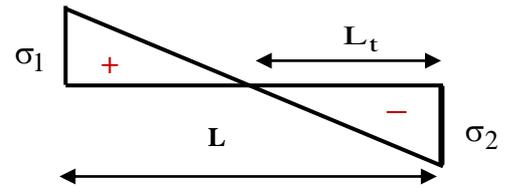
⇒ La section est partiellement comprimée

VII.4.1- Calcul de L_t

$$L_t = \frac{\sigma_2}{\sigma_2 + \sigma_1} \times L = \frac{872.15}{872.15 + 390.40} \times 5,2 = 3,6 \text{ m}$$

VII.4.2- Calcul de la sollicitation équivalente :

$$N_t = \frac{\sigma_2 \times L_t}{2} \times e = \frac{872.15 \times 3,6}{2} \times 0,15 = 235,48 \text{ t}$$



VII.4.3- Armature vertical:

$$A_v = \frac{N_t}{f_e} = \frac{235,48 \times 100}{500} = 47,09 \text{ cm}^2 \epsilon$$

VII.4.4- Armature minimale :

$$A_{\min \text{ RPA}} = \max \left(0,2\% eL_t, \frac{Bf_{t28}}{f_e} \right) \text{ (Article 7.7.4.3 du RPA99V2003)}$$

Avec : $\left\{ \begin{array}{l} e : \text{épaisseur du voile.} \\ L_t : \text{longueur de la section tendue.} \end{array} \right.$

$$0,2\% eL_t = (0,2 \times 0,15 \times 3,6) / 100 = 10,8 \text{ cm}^2$$

$$\frac{Bf_{t28}}{f_e} = \frac{0,15 \times 5,2 \times 2,1}{500} = 32,76 \text{ cm}^2$$

$$A_{\min \text{ RPA}} = \max (47,09 \text{ cm}^2, 32,76 \text{ cm}^2)$$

$$A_{\min \text{ RPA}} = 47,09 \text{ cm}^2$$

$$A_v = 6T16 \text{ cm}^2 \implies \text{Avec un espacement : } S_v = 10 \text{ cm}$$

VII.4.5- La longueur minimale

$$\text{Zone d'about : } \frac{L}{10} = \frac{520}{10} = 52 \text{ cm} \implies \text{avec : } S_t = 10 \text{ cm}$$

$$\text{Zone courante : } L_t = (520 - 2(52)) = 416 \text{ cm} \implies \text{avec : } S_t = 15 \text{ cm}$$

VII.4.6- Armatures horizontales :

$$\text{D'après le BAEL91: } A_H = A_v / 4 = 32,76 / 4 = 8,19 \text{ cm}^2$$

D'après le RPA :

$$A_{\min} = 0,15\% e.h = 0,15\% \times 15 \times 520 = 11,7 \text{ cm}^2.$$

$$A_{\min} = 11,7 \text{ cm}^2.$$

$$\text{Soit donc : } A_H = \max [\text{RPA.V2003 ; BAEL}] = 11,7 \text{ cm}^2$$

$$A_H = 21T8 \implies \text{Avec un espacement : } S_H = 15 \text{ cm}$$

VII.4.7- Armature transversale

Les deux nappes d'armatures verticales doivent être reliées au moins par quatre épingles au mètre carré, soit **4T8**

VII.5- Vérification des contraintes de cisaillement f

La contrainte de cisaillement dans le béton est limitée selon le **RPA99 (art 7.7.2)** à :

$$\tau_{adm} = 0,2 \times f_{c28} = 5 \text{ MPa.}$$

D'après les résultats obtenus des analyses on a $V_{max} = 26,338 \text{ t}$

$$\tau = 1,4 \frac{V}{e.d} = 1,4 \frac{26,338 \times 10^{-2}}{0,15 \times 0,9 \times 2,91} = 0,93 \text{ MPa}$$

$\tau < \tau_{adm}$ Condition vérifiée.

Selon le BAEL: $\tau_b = \frac{V}{b.d} = \frac{26,338 \times 10^{-2}}{0,15 \times 0,9 \times 2,91} = 0,66 \text{ MPa}$

$\tau_b \leq \bar{\tau}_u = \min\left(0,2 \frac{f_{cj}}{\gamma_b}; 5 \text{ MPa}\right) = 3,33 \text{ MPa}$ Condition vérifiée.

5.1- Vérification à L'ELS

On doit vérifier que : $\sigma_{bc} \leq \bar{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 15 \text{ MPa}$

$$\sigma_{bc} = \frac{N_s}{B+15A}$$

Avec: B :section du béton

A : section d'armatures

Ns : effort normal de service (sous G + Q).

$$\sigma_b = \frac{18,798 \times 10^4}{150 \times 5200 + 15 \times 47,09 \times 10^2} = 0,22 \text{ MPa} \leq \bar{\sigma}_b = 15 \text{ MPa}$$
condition vérifiée

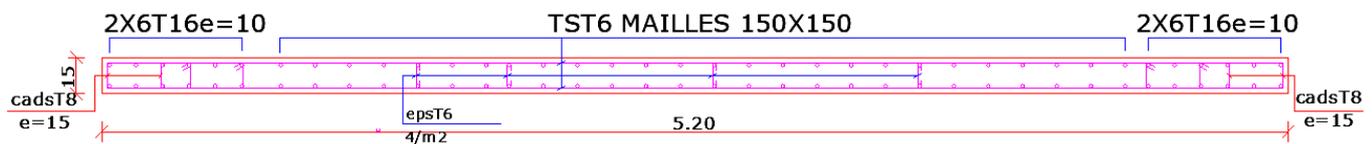


Figure VII-3 : Schéma de ferrailage du voile (V27 ;29)

Les résultats de calcul pour les autres voiles sont regroupés dans les tableaux ci-après :

✓ Voile (V2; V24; V32; V33)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	σ_1 (t/m ²)	σ_2 (t/m ²)	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-1,97	-0,23	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	24,79	34,17	1,87	2,58	3,48	0,70	5,61	(2×5T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-3,64	-0,71	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	40,07	68,87	1,64	2,81	4,92	0,98	4,91	
	G+Q+EY	-3,91	1,85	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	95,90	21,16	3,65	0,80	26,22	5,24	10,94	
	G+Q-EY	-3,64	-2,61	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	1,70	107,25	0,07	4,38	0,01	0,00	0,21	
	08G+EX	-1,44	-0,13	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	18,86	24,27	1,95	2,50	2,75	0,55	5,84	
	08G-EX	-2,75	-0,58	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	29,60	52,94	1,60	2,85	3,54	0,71	4,79	
	08G+EY	-2,75	1,97	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	81,09	1,46	4,37	0,08	26,59	5,32	13,11	
	08G-EY	-2,75	-2,46	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	-8,43	90,98	0,38	4,07	0,24	0,05	1,13	
zone 3	G+Q+EX	-9,27	0,73	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	153,69	124,12	2,46	1,99	28,38	5,68	7,39	(2×5T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-9,27	-2,28	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	92,81	185,00	1,49	2,96	10,35	2,07	4,46	
	G+Q+EY	-9,27	9,25	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	325,73	-47,92	3,88	0,57	94,77	18,95	11,64	
	G+Q-EY	-9,27	-10,80	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	-79,23	357,04	0,81	3,64	4,80	0,96	2,42	
	08G+EX	-6,38	1,01	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	115,94	75,18	2,70	1,75	23,47	4,69	8,10	
	08G-EX	-6,38	-2,01	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	55,05	136,09	1,28	3,17	5,29	1,06	3,85	
	08G+EY	-6,38	9,53	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	287,96	-96,83	3,33	1,12	71,92	14,38	9,99	
	08G-EY	-6,38	-10,52	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	-116,97	308,10	1,22	3,23	10,74	2,15	3,67	
zone 2	G+Q+EX	-14,64	2,10	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	261,80	176,80	2,66	1,79	52,15	10,43	7,97	(2×(3T16 +2T14)) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-14,64	-4,55	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	127,45	311,14	1,29	3,16	12,36	2,47	3,88	
	G+Q+EY	-14,64	19,89	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	621,08	-182,50	3,44	1,01	160,21	32,04	10,32	
	G+Q-EY	-14,64	-22,33	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	-231,84	670,43	1,14	3,31	19,88	3,98	3,43	
	08G+EX	-10,00	2,55	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	201,38	98,36	2,99	1,46	45,16	9,03	8,97	
	08G-EX	-10,00	-4,10	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	67,03	232,71	1,00	3,45	5,00	1,00	2,99	
	08G+EY	-10,00	20,34	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	560,67	-260,92	3,04	1,41	127,70	25,54	9,11	
	08G-EY	-10,00	-21,89	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	-292,25	591,99	1,47	2,98	32,24	6,45	4,41	
zone 1	G+Q+EX	-18,68	4,39	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	368,52	191,12	2,93	1,52	80,99	16,20	8,79	(2×5T16) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-18,68	-7,41	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	130,20	429,43	1,04	3,41	10,11	2,02	3,11	
	G+Q+EY	-18,68	31,75	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	-361,51	921,15	1,25	3,20	34,01	6,80	3,76	
	G+Q-EY	-18,68	-34,77	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	982,08	-422,43	3,11	1,34	229,19	45,84	9,33	
	08G+EX	-12,42	4,96	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	286,26	85,87	3,42	1,03	73,49	14,70	10,27	
	08G-EX	-12,42	-6,84	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	47,92	324,21	0,57	3,88	2,06	0,41	1,72	
	08G+EY	-12,42	32,32	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	838,89	-466,76	2,86	1,59	179,89	35,98	8,58	
	08G-EY	-12,42	-34,20	4,45	0,15	0,67	1,10	2,23	-504,70	876,83	1,63	2,82	61,54	12,31	4,88	

✓ Voile (V1; V23)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	$\sigma_1(t/m^2)$	$\sigma_2(t/m^2)$	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-36,01	25,52	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	32,93	13,69	7,28	3,02	17,97	3,59	21,83	(2×10T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-62,25	-117,51	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-4,01	84,60	0,47	9,83	0,14	0,03	1,40	
	G+Q+EY	-46,04	337,30	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	156,97	-97,38	6,36	3,94	74,83	14,97	19,07	
	G+Q-EY	-522,19	-429,29	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	176,12	499,84	2,68	7,62	35,45	7,09	8,05	
	08G+EX	-22,90	41,28	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	30,38	-0,74	10,06	0,24	22,91	4,58	30,17	
	08G-EX	-49,15	-101,75	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-6,55	70,17	0,88	9,42	0,43	0,09	2,64	
	08G+EY	-32,93	353,06	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	154,43	-111,80	5,97	4,33	69,20	13,84	17,92	
	08G-EY	-39,11	-413,53	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-130,60	181,23	4,31	5,99	42,25	8,45	12,94	
zone 3	G+Q+EX	-59,86	150,59	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	95,52	-18,03	8,66	1,64	62,07	12,41	25,99	(2×10T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-176,18	-351,36	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-18,44	246,51	0,72	9,58	0,99	0,20	2,15	
	G+Q+EY	-107,86	1256,68	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	543,62	-404,00	5,91	4,39	240,91	48,18	17,73	
	G+Q-EY	-128,18	-1457,44	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-466,55	632,47	4,37	5,93	153,00	30,60	13,12	
	08G+EX	-27,19	186,48	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-52,71	87,90	3,86	6,44	15,26	3,05	11,58	
	08G-EX	-143,51	-315,47	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-26,06	211,83	1,13	9,17	2,20	0,44	3,38	
	08G+EY	-75,19	1292,56	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	536,01	-438,67	5,66	4,64	227,71	45,54	16,99	
	08G-EY	-95,51	-1421,56	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-474,16	597,80	4,56	5,74	162,02	32,40	13,67	
zone 2	G+Q+EX	-66,65	355,19	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	177,06	-90,78	6,81	3,49	90,42	18,08	20,43	(2×10T14) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-306,80	-653,71	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-47,89	445,05	1,00	9,30	3,59	0,72	3,00	
	G+Q+EY	-167,83	2490,28	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	1047,55	-830,30	5,75	4,55	451,43	90,29	17,24	
	G+Q-EY	-205,62	-2788,79	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-918,40	1184,57	4,50	5,80	309,83	61,97	13,49	
	08G+EX	-14,46	409,30	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	163,68	-144,96	5,46	4,84	67,06	13,41	16,39	
	08G-EX	-254,62	-599,59	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-61,27	390,87	1,40	8,90	6,41	1,28	4,19	
	08G+EY	-115,64	2544,39	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	1034,18	-884,48	5,55	4,75	430,62	86,12	16,66	
	08G-EY	-153,43	-2734,68	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-931,77	1130,39	4,65	5,65	325,23	65,05	13,96	
zone 1	G+Q+EX	-46,19	488,75	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	214,17	-154,38	5,99	4,31	96,14	19,23	17,96	(2×10T16) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-421,41	-832,33	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-41,06	586,57	0,67	9,63	2,08	0,42	2,02	
	G+Q+EY	-211,67	3206,05	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	1345,81	-1071,80	5,73	4,57	578,73	115,75	17,20	
	G+Q-EY	-255,93	-3549,63	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-1172,69	1503,99	4,51	5,79	396,89	79,38	13,54	
	08G+EX	20,79	554,45	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	195,60	-222,50	4,82	5,48	70,69	14,14	14,46	
	08G-EX	-354,44	-766,63	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-59,64	518,45	1,06	9,24	4,75	0,95	3,19	
	08G+EY	-144,70	3271,75	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	1327,23	-1139,91	5,54	4,76	551,57	110,31	16,62	
	08G-EY	-188,95	-3483,93	10,3	0,15	1,55	13,66	5,15	-1191,28	1435,87	4,67	5,63	417,29	83,46	14,01	

✓ Voile (V4; V19)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	σ_1 (t/m ²)	σ_2 (t/m ²)	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-27,11	-1,97	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-34,23	-41,08	2,18	2,62	5,60	1,12	6,54	(2×9T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-49,78	-8,68	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-54,08	-84,20	1,88	2,92	7,61	1,52	5,63	
	G+Q+EY	-49,78	23,13	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-109,31	-28,98	3,79	1,01	31,10	6,22	11,38	
	G+Q-EY	-49,78	-32,84	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-12,14	-126,15	0,42	4,38	0,38	0,08	1,26	
	08G+EX	-19,69	-1,05	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-25,53	-29,17	2,24	2,56	4,29	0,86	6,72	
	08G-EX	-34,84	-7,06	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-36,14	-60,64	1,79	3,01	4,86	0,97	5,38	
	08G+EY	-34,84	24,75	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-91,37	-5,42	4,53	0,27	31,05	6,21	13,59	
	08G-EY	-34,84	-31,22	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	5,80	-102,59	0,26	4,54	0,11	0,02	0,77	
zone 3	G+Q+EX	-117,80	7,00	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-175,77	-151,46	2,58	2,22	33,99	6,80	7,73	(2×9T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-117,81	-27,01	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-116,72	-210,52	1,71	3,09	14,99	3,00	5,14	
	G+Q+EY	-117,80	114,22	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-361,91	34,68	4,38	0,42	118,90	23,78	13,14	
	G+Q-EY	-117,81	-134,23	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	69,42	-396,66	0,71	4,09	3,72	0,74	2,14	
	08G+EX	-80,29	10,58	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-129,88	-93,15	2,80	2,00	27,23	5,45	8,39	
	08G-EX	-80,29	-23,44	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-70,82	-152,21	1,52	3,28	8,10	1,62	4,57	
	08G+EY	-80,29	117,79	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-316,02	92,99	3,71	1,09	87,90	17,58	11,13	
	08G-EY	-80,29	-130,66	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	115,32	-338,35	1,22	3,58	10,55	2,11	3,66	
zone 2	G+Q+EX	-185,83	21,96	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-296,21	-219,97	2,75	2,05	61,19	12,24	8,26	(2×9T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-185,83	-53,16	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-165,81	-350,38	1,54	3,26	19,17	3,83	4,63	
	G+Q+EY	-185,83	245,43	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-684,19	168,00	3,85	0,95	197,75	39,55	11,56	
	G+Q-EY	-185,83	-276,63	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	222,17	-738,35	1,11	3,69	18,50	3,70	3,33	
	08G+EX	-125,74	27,67	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-222,68	-126,60	3,06	1,74	51,11	10,22	9,18	
	08G-EX	-125,74	-47,44	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-92,27	-257,01	1,27	3,53	8,78	1,76	3,80	
	08G+EY	-125,74	251,14	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-610,65	261,37	3,36	1,44	153,94	30,79	10,08	
	08G-EY	-125,74	-270,92	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	295,70	-644,98	1,51	3,29	33,46	6,69	4,53	
zone 1	G+Q+EX	-231,17	46,07	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-401,05	-241,10	3,00	1,80	90,17	18,03	8,99	(2×9T14) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-231,17	-83,53	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-176,06	-466,09	1,32	3,48	17,38	3,48	3,95	
	G+Q+EY	-231,17	382,80	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-985,66	343,51	3,56	1,24	263,13	52,63	10,68	
	G+Q-EY	-231,17	-420,26	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	408,54	1050,69	1,34	3,46	41,18	8,24	4,03	
	08G+EX	-156,04	53,11	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-308,93	-124,52	3,42	1,38	79,27	15,85	10,26	
	08G-EX	-156,04	-76,49	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-83,93	-349,51	0,93	3,87	5,85	1,17	2,79	
	08G+EY	-156,04	389,84	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	-893,53	460,09	3,17	1,63	212,34	42,47	9,51	
	08G-EY	-156,04	-413,22	4,8	0,15	0,72	1,38	2,4	500,67	-934,11	1,67	3,13	62,90	12,58	5,02	

✓ Voile (V7; V17)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	σ_1 (t/m ²)	σ_2 (t/m ²)	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-48,11	-1,06	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-67,73	-71,72	2,23	2,37	11,35	2,27	6,70	(2×10T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-87,43	-5,58	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-116,16	-137,26	2,11	2,49	18,37	3,67	6,33	
	G+Q+EY	-87,43	20,69	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-165,81	-87,60	3,01	1,59	37,43	7,49	9,03	
	G+Q-EY	-87,43	-26,79	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-76,06	-177,36	1,38	3,22	7,87	1,57	4,14	
	08G+EX	-34,54	-0,63	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-48,86	-51,24	2,25	2,35	8,23	1,65	6,74	
	08G-EX	-60,06	-4,62	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-78,32	-95,78	2,07	2,53	12,15	2,43	6,21	
	08G+EY	-60,06	21,65	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-127,97	-46,12	3,38	1,22	32,45	6,49	10,14	
	08G-EY	-60,06	-25,83	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-38,21	-135,88	1,01	3,59	2,89	0,58	3,03	
zone 3	G+Q+EX	-205,38	3,63	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-304,52	-290,78	2,35	2,25	53,74	10,75	7,06	(2×10T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-205,38	-18,64	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-262,42	-332,88	2,03	2,57	39,91	7,98	6,08	
	G+Q+EY	-205,38	98,02	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-482,95	-112,35	3,73	0,87	135,17	27,03	11,20	
	G+Q-EY	-205,38	-113,03	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-83,99	-511,31	0,65	3,95	4,09	0,82	1,95	
	08G+EX	-136,64	6,29	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-209,92	-186,13	2,44	2,16	38,39	7,68	7,31	
	08G-EX	-136,64	-15,98	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-167,82	-228,23	1,95	2,65	24,53	4,91	5,85	
	08G+EY	-136,64	100,68	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-388,35	-7,70	4,51	0,09	131,38	26,28	13,53	
	08G-EY	-136,64	-110,37	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	10,61	-406,66	0,12	4,48	0,09	0,02	0,35	
zone 2	G+Q+EX	-323,33	12,05	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-491,39	-445,81	2,41	2,19	88,89	17,78	7,24	(2×(6T14 +4T12)) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-323,33	-37,01	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-398,63	-538,57	1,96	2,64	58,50	11,70	5,87	
	G+Q+EY	-323,33	208,30	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-862,35	-74,84	4,23	0,37	273,75	54,75	12,70	
	G+Q-EY	-323,33	-233,26	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-27,66	-909,53	0,14	4,46	0,28	0,06	0,41	
	08G+EX	-213,22	16,62	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-340,42	-277,60	2,53	2,07	64,69	12,94	7,60	
	08G-EX	-213,22	-32,45	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-247,66	-370,36	1,84	2,76	34,24	6,85	5,53	
	08G+EY	-213,22	212,86	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-711,38	93,37	4,07	0,53	216,95	43,39	12,20	
	08G-EY	-213,22	-228,69	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	123,31	-741,32	0,66	3,94	6,07	1,21	1,97	
zone 1	G+Q+EX	-401,97	26,09	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-631,89	-533,23	2,49	2,11	118,23	23,65	7,48	(2×10T16) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-401,97	-60,09	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-468,98	-696,14	1,85	2,75	65,13	13,03	5,55	
	G+Q+EY	-401,97	324,76	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-1196,47	31,35	4,48	0,12	402,24	80,45	13,45	
	G+Q-EY	-401,97	-358,75	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	95,60	-1260,72	0,32	4,28	2,32	0,46	0,97	
	08G+EX	-264,27	32,49	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-444,41	-321,58	2,67	1,93	88,95	17,79	8,01	
	08G-EX	-264,27	-53,69	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-281,50	-484,49	1,69	2,91	35,69	7,14	5,07	
	08G+EY	-264,27	331,15	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	-1008,99	243,00	3,71	0,89	280,54	56,11	11,12	
	08G-EY	-264,27	-352,36	4,6	0,15	0,69	1,22	2,3	283,08	-1049,07	0,98	3,62	20,75	4,15	2,93	

✓ Voile (V8; V18)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	σ_1 (t/m ²)	σ_2 (t/m ²)	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-81,49	0,62	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-146,62	-143,11	1,90	1,85	20,87	4,17	5,69	(2×8T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-81,49	-2,22	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-138,55	-151,18	1,79	1,96	18,63	3,73	5,38	
	G+Q+EY	-81,49	12,42	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-180,19	-109,54	2,33	1,42	31,52	6,30	7,00	
	G+Q-EY	-81,49	-14,02	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-104,98	-184,75	1,36	2,39	10,70	2,14	4,08	
	08G+EX	-55,85	0,81	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-101,59	-96,97	1,92	1,83	14,62	2,92	5,76	
	08G-EX	-55,85	-2,03	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-93,52	-105,04	1,77	1,98	12,39	2,48	5,30	
	08G+EY	-55,85	12,61	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-135,16	-63,40	2,55	1,20	25,88	5,18	7,66	
	08G-EY	-55,85	-13,83	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-59,95	-138,61	1,13	2,62	5,09	1,02	3,40	
zone 3	G+Q+EX	-191,24	3,04	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-348,63	-331,35	1,92	1,83	50,27	10,05	5,77	(2×8T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-191,24	-9,75	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-312,27	-367,71	1,72	2,03	40,33	8,07	5,17	
	G+Q+EY	-191,24	57,28	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-502,91	-177,06	2,77	0,98	104,61	20,92	8,32	
	G+Q-EY	-191,24	-63,99	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-157,98	-522,00	0,87	2,88	10,32	2,06	2,61	
	08G+EX	-126,83	4,21	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-237,44	-213,51	1,97	1,78	35,16	7,03	5,92	
	08G-EX	-126,83	-8,58	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-201,09	-249,87	1,67	2,08	25,22	5,04	5,02	
	08G+EY	-126,83	58,45	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-391,73	-59,22	3,26	0,49	95,70	19,14	9,77	
	08G-EY	-126,83	-62,82	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-46,80	-404,16	0,39	3,36	1,37	0,27	1,17	
zone 2	G+Q+EX	-301,00	7,78	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-557,25	-512,98	1,95	1,80	81,60	16,32	5,86	(2×(4T14 +4T12)) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-301,00	-20,23	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-477,58	-592,65	1,67	2,08	59,94	11,99	5,02	
	G+Q+EY	-301,00	120,51	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-877,89	-192,33	3,08	0,67	202,53	40,51	9,23	
	G+Q-EY	-301,00	-132,95	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-156,94	-913,29	0,55	3,20	6,47	1,29	1,65	
	08G+EX	-197,82	10,04	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-380,24	-323,11	2,03	1,72	57,82	11,56	6,08	
	08G-EX	-197,82	-17,97	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-300,57	-402,78	1,60	2,15	36,13	7,23	4,81	
	08G+EY	-197,82	122,77	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-700,89	-2,46	3,74	0,01	196,43	39,29	11,21	
	08G-EY	-197,82	-130,69	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	20,07	-723,42	0,10	3,65	0,15	0,03	0,30	
zone 1	G+Q+EX	-374,17	16,36	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-711,74	-618,65	2,01	1,74	107,09	21,42	6,02	(2×8T16) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-374,17	-36,32	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-561,88	-768,51	1,58	2,17	66,74	13,35	4,75	
	G+Q+EY	-374,17	196,36	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-1223,72	-106,66	3,45	0,30	316,58	63,32	10,35	
	G+Q-EY	-374,17	-216,32	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-49,89	-1280,50	0,14	3,61	0,53	0,11	0,42	
	08G+EX	-245,14	20,13	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-493,05	-378,56	2,12	1,63	78,44	15,69	6,36	
	08G-EX	-245,14	-32,56	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-343,20	-528,42	1,48	2,27	38,01	7,60	4,43	
	08G+EY	-245,14	200,12	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	-1005,04	133,43	3,31	0,44	249,54	49,91	9,93	
	08G-EY	-245,14	-212,55	3,75	0,15	0,56	0,66	1,88	168,79	-1040,41	0,52	3,23	6,63	1,33	1,57	

✓ Voile (V9; V15)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	σ_1 (t/m ²)	σ_2 (t/m ²)	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-73,39	2,85	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-89,34	-82,33	2,97	2,73	19,88	3,98	8,90	(2x9T10) e = 10 + (2x TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-73,39	-3,89	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-81,05	-90,63	2,69	3,01	16,36	3,27	8,07	
	G+Q+EY	-73,39	45,93	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-142,39	-29,29	4,73	0,97	50,49	10,10	14,18	
	G+Q-EY	-73,39	-46,98	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-28,00	-143,67	0,93	4,77	1,95	0,39	2,79	
	08G+EX	-50,96	2,60	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-62,80	-56,41	3,00	2,70	14,14	2,83	9,01	
	08G-EX	-50,96	-4,14	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-54,51	-64,70	2,61	3,09	10,65	2,13	7,82	
	08G+EY	-50,96	45,68	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-115,85	-3,36	5,54	0,16	48,13	9,63	16,62	
	08G-EY	-50,96	-47,23	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-1,46	-117,75	0,07	5,63	0,01	0,00	0,21	
zone 3	G+Q+EX	-173,13	5,57	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-209,35	-195,63	2,95	2,75	46,26	9,25	8,84	(2x9T12) e = 10 + (2x TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-173,13	-22,14	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-175,23	-229,75	2,47	3,23	32,41	6,48	7,40	
	G+Q+EY	-173,13	186,89	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-432,58	27,60	5,36	0,34	173,84	34,77	16,07	
	G+Q-EY	-173,13	-203,46	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	48,00	-452,98	0,55	5,15	1,97	0,39	1,64	
	08G+EX	-116,80	8,39	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-146,93	-126,28	3,07	2,63	33,78	6,76	9,20	
	08G-EX	-116,80	-19,32	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-112,81	-160,40	2,35	3,35	19,91	3,98	7,06	
	08G+EY	-116,80	189,71	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-370,16	96,96	4,52	1,18	125,40	25,08	13,55	
	08G-EY	-116,80	-200,64	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	110,42	-383,63	1,27	4,43	10,55	2,11	3,82	
zone 2	G+Q+EX	-272,87	11,76	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-333,62	-304,66	2,98	2,72	74,55	14,91	8,94	(2x9T14) e = 10 + (2x TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-272,87	-49,09	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-258,70	-379,58	2,31	3,39	44,82	8,96	6,93	
	G+Q+EY	-272,87	385,56	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-793,82	155,54	4,77	0,93	283,76	56,75	14,30	
	G+Q-EY	-272,87	-422,89	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	201,50	-839,78	1,10	4,60	16,67	3,33	3,31	
	08G+EX	-182,63	18,55	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-236,45	-190,77	3,15	2,55	55,94	11,19	9,46	
	08G-EX	-182,63	-42,30	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-161,53	-265,69	2,16	3,54	26,11	5,22	6,47	
	08G+EY	-182,63	392,35	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-696,65	269,44	4,11	1,59	214,76	42,95	12,33	
	08G-EY	-182,63	-416,10	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	298,68	-725,89	1,66	4,04	37,22	7,44	4,98	
zone 1	G+Q+EX	-306,11	14,21	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-375,52	-340,52	2,99	2,71	84,19	16,84	8,97	(2x9T16) e = 10 + (2x TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-339,36	-86,31	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-290,65	-503,16	2,09	3,61	45,49	9,10	6,26	
	G+Q+EY	-339,36	550,04	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-1074,09	280,28	4,52	1,18	364,15	72,83	13,56	
	G+Q-EY	-339,36	-623,68	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	370,94	-1164,75	1,38	4,32	38,30	7,66	4,13	
	08G+EX	-226,52	26,48	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-297,54	-232,34	3,20	2,50	71,42	14,28	9,60	
	08G-EX	-226,53	-72,50	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-175,68	-354,20	1,89	3,81	24,90	4,98	5,67	
	08G+EY	-226,52	563,85	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-959,12	429,24	3,94	1,76	283,26	56,65	11,81	
	08G-EY	-226,53	-609,87	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	485,90	-1015,78	1,84	3,86	67,21	13,44	5,53	

✓ Voile (V11)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	σ_1 (t/m ²)	σ_2 (t/m ²)	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-5,62	3,10	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-12,28	-2,56	4,18	0,87	3,85	0,77	12,54	(2×6T10) e = 10 + (2×4T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-57,00	-9,74	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-59,97	-90,53	2,01	3,04	9,05	1,81	6,04	
	G+Q+EY	-29,17	28,43	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-83,10	6,09	4,71	0,34	29,32	5,86	14,12	
	G+Q-EY	-33,46	-35,07	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	10,85	-99,18	0,50	4,55	0,40	0,08	1,49	
	08G+EX	2,70	4,06	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-2,80	9,92	1,11	3,94	0,23	0,05	3,33	
	08G-EX	-48,69	-8,78	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-50,50	-78,05	1,98	3,07	7,51	1,50	5,95	
	08G+EY	-20,85	29,39	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-73,62	18,57	4,03	1,02	22,27	4,45	12,10	
	08G-EY	-25,14	-34,12	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	20,32	-86,69	0,96	4,09	1,46	0,29	2,88	
zone 3	G+Q+EX	4,75	2,63	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	2,14	10,40	0,86	4,19	0,14	0,03	2,58	(2×6T10) e = 10 + (2×4T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-168,56	-19,48	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-191,96	-253,07	2,18	2,87	31,36	6,27	6,53	
	G+Q+EY	-59,14	123,08	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-271,11	114,97	3,55	1,50	72,11	14,42	10,64	
	G+Q-EY	-71,45	-140,44	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	125,94	-314,60	1,44	3,61	13,64	2,73	4,33	
	08G+EX	55,97	5,18	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	65,77	82,02	2,25	2,80	11,09	2,22	6,74	
	08G-EX	-150,55	-16,42	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-172,98	-224,50	2,20	2,85	28,51	5,70	6,59	
	08G+EY	-41,13	126,13	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-252,13	143,54	3,22	1,83	60,85	12,17	9,65	
	08G-EY	-53,44	-137,38	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	144,92	-286,02	1,70	3,35	18,46	3,69	5,09	
zone 2	G+Q+EX	84,35	2,46	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	107,49	115,22	2,44	2,61	19,65	3,93	7,31	(2×6T10) e = 10 + (2×4T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-312,27	-33,00	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-360,47	-464,00	2,21	2,84	59,69	11,94	6,62	
	G+Q+EY	-86,45	256,68	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-516,72	288,47	3,24	1,81	125,5 9	25,12	9,72	
	G+Q-EY	-112,63	-288,01	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	303,05	-600,42	1,69	3,36	38,50	7,70	5,08	
	08G+EX	140,97	7,40	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	174,48	197,71	2,37	2,68	30,98	6,20	7,10	
	08G-EX	-284,49	-27,27	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-332,79	-418,33	2,24	2,81	55,84	11,17	6,71	
	08G+EY	-58,67	262,41	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-489,03	334,13	3,00	2,05	110,0 4	22,01	9,00	
	08G-EY	-84,85	-282,28	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	330,73	-554,75	1,89	3,16	46,79	9,36	5,66	
zone 1	G+Q+EX	146,93	-4,04	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	200,30	187,62	2,61	2,44	39,17	7,83	7,82	(2×6T12) e = 10 + (2×4T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-432,50	-45,90	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-498,95	-642,95	2,21	2,84	82,57	16,51	6,62	
	G+Q+EY	-106,42	383,13	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-741,42	460,44	3,12	1,93	173,2 3	34,65	9,35	
	G+Q-EY	-142,19	-428,59	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	484,52	-859,94	1,82	3,23	66,13	13,23	5,46	
	08G+EX	218,91	9,00	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	274,87	303,10	2,40	2,65	49,51	9,90	7,21	
	08G-EX	-397,47	-37,35	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-466,13	-583,30	2,24	2,81	78,42	15,68	6,73	
	08G+EY	-71,40	391,68	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	-708,59	520,09	2,91	2,14	154,7 8	30,96	8,74	
	08G-EY	-107,17	-420,03	5,05	0,15	0,76	1,61	2,53	517,34	-800,29	1,98	3,07	76,93	15,39	5,95	

✓ Voile (V12)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	$\sigma_1(t/m^2)$	$\sigma_2(t/m^2)$	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	8,21	3,65	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-5,98	56,66	0,21	1,95	0,09	0,02	0,62	(2×4T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-33,68	-1,98	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-86,93	-120,95	0,90	1,26	5,89	1,18	2,71	
	G+Q+EY	-10,63	3,33	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-61,35	-4,27	2,02	0,14	9,29	1,86	6,06	
	G+Q-EY	-14,83	-1,66	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-31,56	-60,01	0,74	1,42	1,76	0,35	2,23	
	08G+EX	11,60	3,32	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	7,34	64,29	0,22	1,94	0,12	0,02	0,66	
	08G-EX	-30,29	-2,32	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-73,62	-113,33	0,85	1,31	4,70	0,94	2,55	
	08G+EY	-7,24	3,00	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-48,04	3,35	2,02	0,14	7,27	1,45	6,06	
	08G-EY	-11,44	-1,99	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-18,24	-52,39	0,56	1,60	0,76	0,15	1,67	
zone 3	G+Q+EX	56,85	5,11	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	131,65	219,25	0,81	1,35	8,00	1,60	2,43	(2×4T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-111,52	-4,35	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-306,91	-381,49	0,96	1,20	22,17	4,43	2,89	
	G+Q+EY	-15,93	10,76	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-141,43	43,10	1,66	0,50	17,56	3,51	4,97	
	G+Q-EY	-38,74	-10,00	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-33,82	-205,34	0,31	1,85	0,77	0,15	0,92	
	08G+EX	64,40	4,95	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	156,33	241,23	0,85	1,31	9,96	1,99	2,55	
	08G-EX	-103,96	-4,51	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-282,23	-359,52	0,95	1,21	20,11	4,02	2,85	
	08G+EY	-8,37	10,60	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-116,76	65,08	1,39	0,77	12,15	2,43	4,16	
	08G-EY	-31,19	-10,16	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-9,14	-183,37	0,10	2,06	0,07	0,01	0,31	
zone 2	G+Q+EX	131,68	6,56	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	350,20	462,61	0,93	1,23	24,44	4,89	2,79	(2×4T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-215,39	-6,75	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-606,89	-722,70	0,99	1,17	44,88	8,98	2,96	
	G+Q+EY	-17,06	21,02	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-232,82	127,52	1,40	0,76	24,37	4,87	4,19	
	G+Q-EY	-66,66	-21,21	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-23,87	-387,61	0,13	2,03	0,22	0,04	0,38	
	08G+EX	143,38	6,58	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	386,12	498,93	0,94	1,22	27,29	5,46	2,83	
	08G-EX	-203,69	-6,73	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-570,97	-686,38	0,98	1,18	42,00	8,40	2,94	
	08G+EY	-5,36	21,04	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-196,90	163,84	1,18	0,98	17,41	3,48	3,54	
	08G-EY	-54,96	-21,19	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	12,05	-351,28	0,07	2,09	0,06	0,01	0,21	
zone 1	G+Q+EX	14,68	7,55	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-19,44	110,05	0,32	1,84	0,47	0,09	0,97	(2×4T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-257,85	-8,59	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-722,17	-869,49	0,98	1,18	53,08	10,62	2,94	
	G+Q+EY	-13,06	35,26	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-342,58	261,96	1,22	0,94	31,45	6,29	3,67	
	G+Q-EY	-91,66	-38,61	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	48,16	-613,95	0,16	2,00	0,57	0,11	0,47	
	08G+EX	177,09	7,75	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	480,17	612,97	0,95	1,21	34,17	6,83	2,85	
	08G-EX	-244,65	-8,40	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-683,10	-827,10	0,98	1,18	50,06	10,01	2,93	
	08G+EY	1,73	35,89	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	-302,40	313,06	1,06	1,10	24,07	4,81	3,18	
	08G-EY	-76,87	-37,98	2,16	0,15	0,32	0,13	1,08	88,34	-562,85	0,29	1,87	1,94	0,39	0,88	

✓ Voile (V13)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	$\sigma_1(t/m^2)$	$\sigma_2(t/m^2)$	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-6,18	6,56	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-27,24	6,39	3,20	0,75	6,54	1,31	9,60	(2×5T10) e = 10 + (4T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-6,18	-10,31	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	16,00	-36,86	1,20	2,75	1,44	0,29	3,59	
	G+Q+EY	-6,18	16,17	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-51,89	31,04	2,47	1,48	9,62	1,92	7,41	
	G+Q-EY	-6,18	-19,92	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	40,65	-61,50	1,57	2,38	4,79	0,96	4,72	
	08G+EX	-4,60	7,17	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-26,14	10,61	2,81	1,14	5,51	1,10	8,43	
	08G-EX	-4,60	-9,70	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	17,10	-32,63	1,36	2,59	1,74	0,35	4,07	
	08G+EY	-4,60	16,78	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-50,79	35,26	2,33	1,62	8,88	1,78	6,99	
	08G-EY	-4,60	-19,31	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	41,75	-57,28	1,67	2,28	5,21	1,04	5,00	
zone 3	G+Q+EX	-57,62	-2,57	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-90,66	-103,84	1,84	2,11	12,52	2,50	5,52	(2×5T10) e = 10 + (4T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-57,62	-3,35	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-88,65	-105,85	1,80	2,15	11,97	2,39	5,40	
	G+Q+EY	-57,62	57,23	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-243,96	49,46	3,28	0,67	60,09	12,02	9,85	
	G+Q-EY	-57,62	-63,15	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	64,65	-259,15	0,79	3,16	3,82	0,76	2,37	
	08G+EX	-42,09	-1,55	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-67,06	-75,03	1,86	2,09	9,38	1,88	5,59	
	08G-EX	-42,09	-2,34	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-65,05	-77,04	1,81	2,14	8,82	1,76	5,43	
	08G+EY	-42,09	58,24	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-220,36	78,27	2,91	1,04	48,17	9,63	8,74	
	08G-EY	-42,09	-62,13	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	88,25	-230,34	1,09	2,86	7,24	1,45	3,28	
zone 2	G+Q+EX	-80,44	-5,48	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-121,70	-149,82	1,77	2,18	16,16	3,23	5,31	(2×5T10) e = 10 + (4T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-80,44	-6,96	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-117,93	-153,59	1,72	2,23	15,17	3,03	5,15	
	G+Q+EY	-80,44	117,76	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-437,65	166,13	2,86	1,09	93,98	18,80	8,59	
	G+Q-EY	-80,44	-130,19	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	198,02	-469,54	1,17	2,78	17,40	3,48	3,52	
	08G+EX	-58,74	-3,23	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-90,87	-107,41	1,81	2,14	12,34	2,47	5,43	
	08G-EX	-58,74	-4,70	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-87,10	-111,18	1,74	2,21	11,33	2,27	5,21	
	08G+EY	-58,74	120,01	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-406,81	208,54	2,61	1,34	79,68	15,94	7,83	
	08G-EY	-58,74	-127,94	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	228,85	-427,13	1,38	2,57	23,65	4,73	4,13	
zone 1	G+Q+EX	-97,19	-9,25	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-140,32	-187,73	1,69	2,26	17,78	3,56	5,07	(2×5T12) e = 10 + (4T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-97,19	-12,38	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-132,29	-195,76	1,59	2,36	15,80	3,16	4,78	
	G+Q+EY	-97,19	185,28	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-639,02	310,97	2,66	1,29	127,34	25,47	7,97	
	G+Q-EY	-97,19	-206,90	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	366,41	-694,46	1,36	2,59	37,49	7,50	4,09	
	08G+EX	-70,80	-5,17	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-106,25	-132,75	1,76	2,19	13,99	2,80	5,27	
	08G-EX	-70,80	-8,30	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-98,22	-140,78	1,62	2,33	11,96	2,39	4,87	
	08G+EY	-70,80	189,36	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	-604,95	365,96	2,46	1,49	111,67	22,33	7,38	
	08G-EY	-70,80	-202,82	3,95	0,15	0,59	0,77	1,98	400,48	-639,48	1,52	2,43	45,69	9,14	4,56	

✓ Voile (V14)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	$\sigma_1(t/m^2)$	$\sigma_2(t/m^2)$	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-43,49	-3,94	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-46,02	-55,71	2,58	3,12	8,90	1,78	7,73	(2×6T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-43,49	-7,28	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-41,91	-59,82	2,35	3,35	7,38	1,48	7,04	
	G+Q+EY	-43,49	39,51	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-99,51	-2,22	5,58	0,12	41,62	8,32	16,73	
	G+Q-EY	-43,49	-50,73	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	11,59	-113,32	0,53	5,17	0,46	0,09	1,59	
	08G+EX	-31,40	-2,16	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-34,06	-39,38	2,64	3,06	6,75	1,35	7,93	
	08G-EX	-31,40	-5,50	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-29,95	-43,49	2,32	3,38	5,22	1,04	6,97	
	08G+EY	-21,65	13,51	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-41,95	-8,70	4,72	0,98	14,85	2,97	14,16	
	08G-EY	-31,40	-48,95	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	23,55	-96,99	1,11	4,59	1,97	0,39	3,34	
zone 3	G+Q+EX	-84,73	-8,05	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-89,19	-109,01	2,56	3,14	17,16	3,43	7,69	(2×6T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-84,73	-20,38	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-74,01	-124,19	2,13	3,57	11,82	2,36	6,39	
	G+Q+EY	-84,73	174,43	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-313,86	115,65	4,17	1,53	98,04	19,61	12,50	
	G+Q-EY	-84,73	-202,86	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	150,65	-348,86	1,72	3,98	19,42	3,88	5,16	
	08G+EX	-50,88	-3,03	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-55,78	-63,24	2,67	3,03	11,18	2,24	8,01	
	08G-EX	-60,63	-15,33	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-52,03	-89,78	2,09	3,61	8,16	1,63	6,27	
	08G+EY	-60,62	179,48	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-291,87	150,06	3,76	1,94	82,41	16,48	11,29	
	08G-EY	-60,62	-197,82	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	172,64	-314,45	2,02	3,68	26,16	5,23	6,06	
zone 2	G+Q+EX	-125,97	-9,90	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-135,15	-159,52	2,61	3,09	26,50	5,30	7,84	(2×6T14) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-125,97	-37,56	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-101,10	-193,58	1,96	3,74	14,83	2,97	5,87	
	G+Q+EY	-125,97	365,40	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-597,20	302,53	3,78	1,92	169,46	33,89	11,35	
	G+Q-EY	-125,97	-412,86	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	360,95	-655,63	2,02	3,68	54,79	10,96	6,07	
	08G+EX	-70,37	-2,66	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-79,03	-85,57	2,74	2,96	16,22	3,24	8,21	
	08G-EX	-89,85	-28,87	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-69,55	-140,63	1,89	3,81	9,84	1,97	5,66	
	08G+EY	-89,85	374,09	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-565,65	355,47	3,50	2,20	148,50	29,70	10,50	
	08G-EY	-89,85	-404,17	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	392,50	-602,68	2,25	3,45	66,18	13,24	6,74	
zone 1	G+Q+EX	-153,47	-10,45	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-166,62	-192,36	2,65	3,05	33,06	6,61	7,94	(2×6T16) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-153,47	-54,17	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-112,80	-246,19	1,79	3,91	15,15	3,03	5,37	
	G+Q+EY	-153,47	530,10	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-832,12	473,13	3,63	2,07	226,78	45,36	10,90	
	G+Q-EY	-153,47	-594,72	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	552,69	-911,68	2,15	3,55	89,18	17,84	6,45	
	08G+EX	-109,34	1,67	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-129,94	-125,82	2,90	2,80	28,22	5,64	8,69	
	08G-EX	-109,34	-42,04	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-76,12	-179,64	1,70	4,00	9,68	1,94	5,09	
	08G+EY	-109,34	542,22	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	-795,44	539,68	3,40	2,30	202,59	40,52	10,19	
	08G-EY	-109,34	-582,59	5,7	0,15	0,86	2,31	2,85	589,38	-845,14	2,34	3,36	103,52	20,70	7,03	

✓ Voile (V25;V30)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	$\sigma_1(t/m^2)$	$\sigma_2(t/m^2)$	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-9,96	-0,14	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-27,27	-29,25	1,13	1,22	2,32	0,46	3,40	(2×4T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-18,43	-0,66	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-47,49	-57,09	1,07	1,28	3,80	0,76	3,20	
	G+Q+EY	-18,43	2,49	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-70,32	-34,26	1,58	0,77	8,33	1,67	4,74	
	G+Q-EY	-18,43	-3,28	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-28,54	-76,04	0,64	1,71	1,37	0,27	1,92	
	08G+EX	-7,30	-0,08	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-20,16	-21,25	1,14	1,21	1,73	0,35	3,43	
	08G-EX	-13,07	-0,54	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-33,18	-40,97	1,05	1,30	2,62	0,52	3,15	
	08G+EY	-13,07	2,61	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-56,01	-18,14	1,78	0,57	7,46	1,49	5,33	
	08G-EY	-13,07	-3,15	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-14,23	-59,92	0,45	1,90	0,48	0,10	1,35	
zone 3	G+Q+EX	-43,84	0,22	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-125,94	-122,81	1,19	1,16	11,24	2,25	3,57	(2×4T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-43,84	-2,20	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-108,43	-140,33	1,02	1,33	8,33	1,67	3,07	
	G+Q+EY	-43,84	12,69	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-216,30	-32,45	2,04	0,31	33,15	6,63	6,13	
	G+Q-EY	-43,84	-14,68	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-18,07	-230,68	0,17	2,18	0,23	0,05	0,51	
	08G+EX	-30,38	0,57	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-90,30	-82,07	1,23	1,12	8,34	1,67	3,69	
	08G-EX	-30,38	-1,85	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-72,79	-99,59	0,99	1,36	5,42	1,08	2,98	
	08G+EY	-30,38	13,04	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-180,66	8,29	2,25	0,10	30,45	6,09	6,74	
	08G-EY	-30,38	-14,33	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	17,57	-189,95	0,20	2,15	0,26	0,05	0,60	
zone 2	G+Q+EX	-69,25	9,72	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-266,83	-126,08	1,60	0,75	31,94	6,39	4,79	(2×4T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-69,25	-4,27	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-165,57	-227,36	0,99	1,36	12,30	2,46	2,97	
	G+Q+EY	-69,25	26,80	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-390,59	-2,33	2,34	0,01	68,43	13,69	7,01	
	G+Q-EY	-69,25	-30,10	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	21,53	-414,45	0,12	2,23	0,19	0,04	0,35	
	08G+EX	-47,69	1,57	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-146,69	-123,90	1,27	1,08	14,02	2,80	3,82	
	08G-EX	-47,70	-3,66	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-108,77	-161,84	0,94	1,41	7,71	1,54	2,83	
	08G+EY	-47,69	27,40	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-333,79	63,19	1,98	0,37	49,46	9,89	5,93	
	08G-EY	-47,69	-29,49	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	78,33	-348,93	0,43	1,92	2,53	0,51	1,29	
zone 1	G+Q+EX	-88,29	3,55	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-276,19	-224,72	1,30	1,05	26,84	5,37	3,89	(2×4T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-88,29	-8,02	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-192,37	-308,56	0,90	1,45	13,02	2,60	2,71	
	G+Q+EY	-88,29	49,73	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-610,69	109,77	1,99	0,36	91,23	18,25	5,98	
	G+Q-EY	-88,29	-54,20	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	142,13	-643,06	0,43	1,92	4,53	0,91	1,28	
	08G+EX	-59,23	4,39	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-199,86	-136,21	1,40	0,95	20,95	4,19	4,19	
	08G-EX	-59,24	-7,18	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-116,04	-220,05	0,81	1,54	7,06	1,41	2,43	
	08G+EY	-59,23	50,58	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	-534,36	198,29	1,71	0,64	68,69	13,74	5,14	
	08G-EY	-59,23	-53,36	2,35	0,15	0,35	0,16	1,18	218,46	-554,54	0,66	1,69	10,88	2,18	1,99	

✓ Voile (V27;V29)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	$\sigma_1(t/m^2)$	$\sigma_2(t/m^2)$	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-39,22	-5,78	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-41,73	-58,83	2,16	3,04	6,75	1,35	6,47	(2×6T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-39,22	-9,46	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-36,29	-64,27	1,88	3,32	5,11	1,02	5,63	
	G+Q+EY	-39,22	26,49	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-89,46	-11,09	4,63	0,57	31,04	6,21	13,88	
	G+Q-EY	-39,22	-41,40	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	10,96	-111,52	0,47	4,73	0,38	0,08	1,40	
	08G+EX	-27,87	-3,24	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-30,94	-40,52	2,25	2,95	5,22	1,04	6,75	
	08G-EX	-27,87	-6,89	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-25,54	-45,92	1,86	3,34	3,56	0,71	5,58	
	08G+EY	-27,87	29,06	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-78,71	7,26	4,76	0,44	28,11	5,62	14,28	
	08G-EY	-27,87	-38,83	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	21,71	-93,16	0,98	4,22	1,60	0,32	2,95	
zone 3	G+Q+EX	-93,36	-7,58	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-108,48	-130,91	2,36	2,84	19,17	3,83	7,07	(2×6T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-93,36	-22,22	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-86,83	-152,57	1,89	3,31	12,28	2,46	5,66	
	G+Q+EY	-93,36	131,14	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-313,69	74,30	4,20	1,00	98,91	19,78	12,61	
	G+Q-EY	-93,36	-159,44	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	116,17	-355,56	1,28	3,92	11,16	2,23	3,84	
	08G+EX	-40,20	-3,35	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-46,58	-56,50	2,35	2,85	8,21	1,64	7,05	
	08G-EX	-64,87	-17,13	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-57,82	-108,52	1,81	3,39	7,84	1,57	5,42	
	08G+EY	-64,87	136,23	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-284,68	118,35	3,67	1,53	78,42	15,68	11,02	
	08G-EY	-15,62	-154,36	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	208,32	-248,36	2,37	2,83	37,06	7,41	7,12	
zone 2	G+Q+EX	-111,41	-7,54	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-131,67	-153,99	2,40	2,80	23,67	4,73	7,19	(2×6T14) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-147,51	-38,83	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-131,68	-246,55	1,81	3,39	17,88	3,58	5,43	
	G+Q+EY	-147,51	280,05	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-603,38	225,16	3,79	1,41	171,3 7	34,27	11,36	
	G+Q-EY	-147,51	-322,32	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	287,69	-665,91	1,57	3,63	33,85	6,77	4,71	
	08G+EX	-101,87	4,39	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-137,10	-124,11	2,73	2,47	28,07	5,61	8,19	
	08G-EX	-101,88	-30,99	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-84,76	-176,46	1,69	3,51	10,73	2,15	5,06	
	08G+EY	-101,87	287,88	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-556,47	295,26	3,40	1,80	141,7 9	28,36	10,19	
	08G-EY	-101,88	-314,48	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	334,60	-595,82	1,87	3,33	46,93	9,39	5,61	
zone 1	G+Q+EX	-187,99	7,75	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-252,48	-229,54	2,72	2,48	51,58	10,32	8,17	(2×6T16) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-187,99	-51,98	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-164,12	-317,90	1,77	3,43	21,79	4,36	5,31	
	G+Q+EY	-187,99	424,81	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-869,42	387,40	3,60	1,60	234,5 6	46,91	10,79	
	G+Q-EY	-187,99	-469,03	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	452,82	-934,84	1,70	3,50	57,63	11,53	5,09	
	08G+EX	-126,54	15,90	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-185,75	-138,71	2,98	2,22	41,47	8,29	8,93	
	08G-EX	-126,55	-43,83	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-97,40	-227,07	1,56	3,64	11,40	2,28	4,68	
	08G+EY	-126,54	432,95	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	-802,69	478,23	3,26	1,94	196,1 7	39,23	9,78	
	08G-EY	-126,54	-460,88	5,2	0,15	0,78	1,76	2,6	519,54	-844,02	1,98	3,22	77,20	15,44	5,94	

✓ Voile (V26; V31)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	$\sigma_1(t/m^2)$	$\sigma_2(t/m^2)$	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-4,97	-0,19	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-21,59	-31,04	0,52	0,74	0,84	0,17	1,55	(2×3T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-4,97	-0,22	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-20,67	-31,97	0,49	0,77	0,77	0,15	1,48	
	G+Q+EY	-9,22	0,27	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-55,55	-42,04	0,72	0,54	2,99	0,60	2,15	
	G+Q-EY	-9,22	-0,62	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-33,16	-64,44	0,43	0,83	1,06	0,21	1,28	
	08G+EX	-3,65	-0,12	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-16,25	-22,40	0,53	0,73	0,65	0,13	1,59	
	08G-EX	-3,65	-0,16	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-15,35	-23,31	0,50	0,76	0,58	0,12	1,50	
	08G+EY	-6,57	0,33	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-43,10	-26,37	0,78	0,48	2,53	0,51	2,35	
	08G-EY	-6,57	-0,56	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-20,70	-48,77	0,38	0,88	0,58	0,12	1,13	
zone 3	G+Q+EX	-13,47	-0,15	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-67,62	-74,95	0,60	0,66	3,03	0,61	1,79	(2×3T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-21,97	-0,46	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-104,56	-127,94	0,57	0,69	4,44	0,89	1,70	
	G+Q+EY	-21,97	1,83	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-162,23	-70,26	0,88	0,38	10,70	2,14	2,64	
	G+Q-EY	-21,97	-2,38	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-56,25	-176,26	0,30	0,96	1,29	0,26	0,91	
	08G+EX	-9,48	-0,07	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-48,41	-51,86	0,61	0,65	2,21	0,44	1,83	
	08G-EX	-15,30	-0,36	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-71,80	-90,09	0,56	0,70	3,01	0,60	1,68	
	08G+EY	-15,30	1,93	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-129,47	-32,41	1,01	0,25	9,79	1,96	3,02	
	08G-EY	-15,30	-2,28	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-23,49	-138,40	0,18	1,08	0,32	0,06	0,55	
zone 2	G+Q+EX	-26,22	-0,09	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-136,58	-140,89	0,62	0,64	6,35	1,27	1,86	(2×3T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-34,72	-0,78	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-164,03	-203,38	0,56	0,70	6,92	1,38	1,69	
	G+Q+EY	-34,72	4,09	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-286,79	-80,62	0,98	0,28	21,15	4,23	2,95	
	G+Q-EY	-34,72	-4,82	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-62,15	-305,26	0,21	1,05	0,99	0,20	0,64	
	08G+EX	-24,03	0,18	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-131,62	-122,68	0,65	0,61	6,44	1,29	1,96	
	08G-EX	-24,03	-0,65	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-110,75	-143,56	0,55	0,71	4,56	0,91	1,65	
	08G+EY	-24,03	4,22	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-233,51	-20,80	1,16	0,10	20,26	4,05	3,47	
	08G-EY	-24,03	-4,69	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-8,87	-245,45	0,04	1,22	0,03	0,01	0,13	
zone 1	G+Q+EX	-44,24	0,61	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-249,37	-218,73	0,67	0,59	12,55	2,51	2,01	(2×3T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-44,24	-1,42	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-198,37	-269,74	0,53	0,73	7,94	1,59	1,60	
	G+Q+EY	-44,24	8,43	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-446,57	-21,54	1,20	0,06	40,26	8,05	3,61	
	G+Q-EY	-44,24	-9,24	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-1,18	-466,94	0,00	1,26	0,00	0,00	0,01	
	08G+EX	-29,86	0,77	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-177,39	-138,53	0,71	0,55	9,41	1,88	2,12	
	08G-EX	-29,86	-1,25	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-126,38	-189,54	0,50	0,76	4,78	0,96	1,51	
	08G+EY	-29,86	8,60	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	-374,59	58,66	1,09	0,17	30,61	6,12	3,27	
	08G-EY	-29,86	-9,08	1,26	0,15	0,19	0,03	0,63	70,81	-386,74	0,20	1,06	1,04	0,21	0,59	

✓ Voile (V28)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	$\sigma_1(t/m^2)$	$\sigma_2(t/m^2)$	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-57,04	-4,70	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-56,44	-66,22	2,85	3,35	12,08	2,42	8,56	(2×5T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-58,37	-7,34	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-55,13	-70,41	2,72	3,48	11,26	2,25	8,17	
	G+Q+EY	-14,14	78,03	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-96,40	65,98	3,68	2,52	26,61	5,32	11,04	
	G+Q-EY	-101,27	-90,07	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-15,17	-202,61	0,43	5,77	0,49	0,10	1,30	
	08G+EX	-40,13	-2,86	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-40,18	-46,12	2,89	3,31	8,70	1,74	8,66	
	08G-EX	-41,47	-5,50	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-38,86	-50,31	2,70	3,50	7,88	1,58	8,11	
	08G+EY	2,77	79,87	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-80,14	86,08	2,99	3,21	17,97	3,59	8,97	
	08G-EY	-84,36	-88,22	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	1,09	-182,51	0,04	6,16	0,00	0,00	0,11	
zone 3	G+Q+EX	-131,70	-16,48	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-124,47	-158,76	2,72	3,48	25,44	5,09	8,17	(2×5T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-133,47	-20,37	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-122,31	-164,71	2,64	3,56	24,24	4,85	7,93	
	G+Q+EY	16,31	254,91	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-247,71	282,80	2,89	3,31	53,78	10,76	8,68	
	G+Q-EY	-281,49	-291,76	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	0,93	-606,27	0,01	6,19	0,00	0,00	0,03	
	08G+EX	-90,66	-10,05	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-87,03	-107,94	2,77	3,43	18,06	3,61	8,30	
	08G-EX	-92,43	-13,95	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-84,87	-113,89	2,65	3,55	16,85	3,37	7,94	
	08G+EY	57,36	261,34	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-210,27	333,62	2,40	3,80	37,80	7,56	7,19	
	08G-EY	-240,44	-285,33	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	38,37	-555,45	0,40	5,80	1,15	0,23	1,20	
zone 2	G+Q+EX	-204,27	-27,22	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-191,33	-247,97	2,70	3,50	38,75	7,75	8,10	(2×5T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-208,60	-34,69	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-188,21	-260,40	2,60	3,60	36,72	7,34	7,80	
	G+Q+EY	71,96	476,43	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-418,40	573,14	2,62	3,58	82,10	16,42	7,85	
	G+Q-EY	-484,83	-538,34	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	38,87	-1081,51	0,22	5,98	0,63	0,13	0,65	
	08G+EX	-139,52	-16,41	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-132,95	-167,10	2,75	3,45	27,39	5,48	8,24	
	08G-EX	-143,86	-23,88	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-129,83	-179,53	2,60	3,60	25,34	5,07	7,81	
	08G+EY	136,70	487,24	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-360,03	654,01	2,20	4,00	59,44	11,89	6,60	
	08G-EY	-420,08	-527,53	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	97,24	-1000,64	0,55	5,65	4,00	0,80	1,65	
zone 1	G+Q+EX	-256,41	-43,02	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-230,95	-320,47	2,60	3,60	44,98	9,00	7,79	(2×5T14) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-264,20	-50,74	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-231,29	-336,88	2,52	3,68	43,78	8,76	7,57	
	G+Q+EY	81,50	600,60	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-537,34	712,61	2,67	3,53	107,41	21,48	8,00	
	G+Q-EY	-602,11	-694,36	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	75,10	-1369,97	0,32	5,88	1,82	0,36	0,97	
	08G+EX	-170,69	-24,51	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-158,04	-209,04	2,67	3,53	31,64	6,33	8,01	
	08G-EX	-178,48	-32,23	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-158,38	-225,45	2,56	3,64	30,39	6,08	7,67	
	08G+EY	167,22	619,11	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	-464,43	824,04	2,23	3,97	77,84	15,57	6,70	
	08G-EY	-516,39	-675,85	6,2	0,15	0,93	2,98	3,1	148,02	-1258,54	0,65	5,55	7,24	1,45	1,96	

✓ Voile (V34; V36)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	σ_1 (t/m ²)	σ_2 (t/m ²)	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	3,60	8,54	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-73,41	97,40	0,86	1,14	4,73	0,95	2,58	(2×3T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-22,17	-8,80	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	14,15	-161,93	0,16	1,84	0,17	0,03	0,48	
	G+Q+EY	-3,73	1,31	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-25,55	0,71	1,95	0,05	3,73	0,75	5,84	
	G+Q-EY	-6,23	-1,42	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-6,56	-34,99	0,32	1,68	0,16	0,03	0,95	
	08G+EX	6,06	8,28	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-62,61	102,99	0,76	1,24	3,55	0,71	2,27	
	08G-EX	-19,84	-8,47	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	18,55	-150,81	0,22	1,78	0,30	0,06	0,66	
	08G+EY	-2,51	1,00	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-18,33	1,58	1,84	0,16	2,53	0,51	5,52	
	08G-EY	-5,08	-1,06	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-6,30	-27,55	0,37	1,63	0,18	0,04	1,12	
zone 3	G+Q+EX	34,84	29,57	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-179,54	411,79	0,61	1,39	8,18	1,64	1,82	(2×3T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-80,51	-29,97	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	31,38	-568,08	0,10	1,90	0,25	0,05	0,31	
	G+Q+EY	-13,15	1,11	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-54,91	-32,78	1,25	0,75	5,16	1,03	3,76	
	G+Q-EY	-32,51	-1,44	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-93,97	-122,74	0,87	1,13	6,11	1,22	2,60	
	08G+EX	41,17	29,35	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-156,31	430,76	0,53	1,47	6,24	1,25	1,60	
	08G-EX	-74,46	-29,63	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	48,13	-544,50	0,16	1,84	0,59	0,12	0,49	
	08G+EY	-6,83	0,89	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-31,68	-13,82	1,39	0,61	3,31	0,66	4,18	
	08G-EY	-26,46	-1,10	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-77,22	-99,15	0,88	1,12	5,07	1,01	2,63	
zone 2	G+Q+EX	82,86	56,94	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-293,18	845,61	0,51	1,49	11,32	2,26	1,54	(2×3T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-155,91	-57,48	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	55,08	-1094,45	0,10	1,90	0,40	0,08	0,29	
	G+Q+EY	-14,87	1,09	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-60,45	-38,65	1,22	0,78	5,53	1,11	3,66	
	G+Q-EY	-39,88	-1,44	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-118,51	-147,34	0,89	1,11	7,92	1,58	2,67	
	08G+EX	93,08	56,77	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-257,48	878,00	0,45	1,55	8,76	1,75	1,36	
	08G-EX	-146,09	-57,13	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	84,36	-1058,29	0,15	1,85	0,93	0,19	0,44	
	08G+EY	-7,24	0,89	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-33,07	-15,22	1,37	0,63	3,40	0,68	4,11	
	08G-EY	-32,58	-1,10	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-97,61	-119,57	0,90	1,10	6,58	1,32	2,70	
zone 1	G+Q+EX	141,52	104,48	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-573,07	1516,52	0,55	1,45	23,57	4,71	1,65	(2×3T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-234,81	-105,06	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	267,95	-1833,32	0,26	1,74	5,13	1,03	0,77	
	G+Q+EY	-20,71	0,92	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-78,22	-59,87	1,13	0,87	6,65	1,33	3,40	
	G+Q-EY	-61,53	-1,37	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-191,45	-218,76	0,93	1,07	13,40	2,68	2,80	
	08G+EX	154,60	104,56	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-530,26	1560,95	0,51	1,49	20,17	4,03	1,52	
	08G-EX	-221,27	-104,95	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	311,89	-1787,03	0,30	1,70	6,95	1,39	0,89	
	08G+EY	-9,23	0,66	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-37,34	-24,21	1,21	0,79	3,40	0,68	3,64	
	08G-EY	-55,76	-0,94	2,16	0,15	0,3	0,1	1,08	-176,50	-195,26	0,95	1,05	12,57	2,51	2,85	

✓ Voile (V35; V37)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	$\sigma_1(t/m^2)$	$\sigma_2(t/m^2)$	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-54,56	91,43	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-205,85	65,70	3,93	1,26	60,74	12,15	11,80	(2×10T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-54,57	-94,29	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	69,93	-210,11	1,30	3,89	6,80	1,36	3,89	
	G+Q+EY	-54,56	7,47	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-81,18	-58,99	3,01	2,18	18,30	3,66	9,02	
	G+Q-EY	-54,56	-10,33	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-54,75	-85,42	2,03	3,16	8,32	1,66	6,08	
	08G+EX	-38,16	89,19	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-181,46	83,42	3,56	1,63	48,39	9,68	10,67	
	08G-EX	-38,17	-91,21	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	86,42	-184,48	1,66	3,53	10,73	2,15	4,97	
	08G+EY	-38,17	5,23	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-56,79	-41,26	3,01	2,18	12,80	2,56	9,02	
	08G-EY	-38,17	-7,25	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-38,26	-59,79	2,03	3,16	5,81	1,16	6,08	
zone 3	G+Q+EX	-129,07	362,77	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-704,50	372,91	3,39	1,80	179,31	35,86	10,18	(2×10T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-129,10	-367,99	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	380,64	-712,30	1,81	3,38	51,60	10,32	5,42	
	G+Q+EY	-104,24	-7,76	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-122,37	-145,42	2,37	2,82	21,77	4,35	7,11	
	G+Q-EY	-129,08	-12,52	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-147,21	-184,41	2,30	2,89	25,44	5,09	6,91	
	08G+EX	-87,90	360,81	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-648,71	422,88	3,14	2,05	152,86	30,57	9,43	
	08G-EX	-87,93	-364,37	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	428,14	-654,04	2,05	3,14	65,93	13,19	6,16	
	08G+EY	-87,92	5,34	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-120,85	-105,00	2,78	2,41	25,17	5,03	8,33	
	08G-EY	-87,92	-8,90	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-99,71	-126,15	2,29	2,90	17,14	3,43	6,87	
zone 2	G+Q+EX	-203,59	735,74	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-1354,08	831,06	3,22	1,97	326,62	65,32	9,65	(2×10T14) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-203,62	-742,81	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	841,51	-1364,63	1,98	3,21	124,94	24,99	5,94	
	G+Q+EY	-178,76	-7,49	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-218,50	-240,75	2,47	2,72	40,46	8,09	7,41	
	G+Q-EY	-203,61	-14,47	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-240,04	-283,03	2,38	2,81	42,88	8,58	7,15	
	08G+EX	-137,65	734,32	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-1267,28	913,65	3,02	2,17	286,64	57,33	9,05	
	08G-EX	-137,69	-739,04	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	920,60	-1274,33	2,18	3,01	150,30	30,06	6,53	
	08G+EY	-137,67	5,99	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-185,73	-167,94	2,73	2,46	37,97	7,59	8,18	
	08G-EY	-137,67	-10,70	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-160,95	-192,73	2,36	2,83	28,51	5,70	7,09	
zone 1	G+Q+EX	-254,97	1160,18	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-2050,38	1395,34	3,09	2,10	474,92	94,98	9,26	(2×10T16) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-255,02	-1167,98	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	1406,88	-2062,02	2,10	3,09	222,10	44,42	6,31	
	G+Q+EY	-228,44	6,00	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-302,35	-284,54	2,67	2,52	60,63	12,13	8,02	
	G+Q-EY	-255,00	-13,60	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-307,35	-347,74	2,43	2,76	56,13	11,23	7,30	
	08G+EX	-170,81	1160,03	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-1942,05	1503,23	2,93	2,26	426,11	85,22	8,78	
	08G-EX	-170,86	-1165,20	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	1510,85	-1949,78	2,27	2,92	256,75	51,35	6,80	
	08G+EY	-170,83	5,65	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-227,82	-211,05	2,69	2,50	46,03	9,21	8,08	
	08G-EY	-170,84	-10,82	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-203,38	-235,50	2,41	2,78	36,69	7,34	7,22	

✓ Voile (V39)

	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	$\sigma_1(t/m^2)$	$\sigma_2(t/m^2)$	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-6,86	9,98	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-127,27	80,60	1,20	0,76	11,46	2,29	3,60	(2×4T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-16,36	-9,71	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	45,46	-156,73	0,44	1,52	1,50	0,30	1,32	
	G+Q+EY	-0,77	9,89	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-105,54	100,34	1,00	0,96	7,95	1,59	3,01	
	G+Q-EY	-10,58	-5,91	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	25,54	-97,52	0,41	1,55	0,78	0,16	1,22	
	08G+EX	-3,74	9,93	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-116,15	90,70	1,10	0,86	9,59	1,92	3,30	
	08G-EX	-13,24	-9,76	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	56,57	-146,64	0,55	1,41	2,32	0,46	1,64	
	08G+EY	0,77	9,28	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-94,00	99,21	0,95	1,01	6,72	1,34	2,86	
	08G-EY	-9,05	-6,52	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	37,08	-98,64	0,54	1,42	1,49	0,30	1,61	
zone 3	G+Q+EX	-4,79	29,07	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-319,01	286,40	1,03	0,93	24,71	4,94	3,10	(2×4T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-42,95	-28,89	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	154,76	-446,90	0,50	1,46	5,85	1,17	1,51	
	G+Q+EY	-10,13	1,15	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-46,39	-22,52	1,32	0,64	4,59	0,92	3,96	
	G+Q-EY	-37,61	-0,97	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-117,86	-137,98	0,90	1,06	7,98	1,60	2,71	
	08G+EX	1,74	29,04	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-296,47	308,28	0,96	1,00	21,36	4,27	2,88	
	08G-EX	-36,42	-28,92	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	177,30	-425,02	0,58	1,38	7,67	1,53	1,73	
	08G+EY	-3,60	1,11	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-23,85	-0,64	1,91	0,05	3,41	0,68	5,73	
	08G-EY	-31,08	-1,00	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-95,32	-116,10	0,88	1,08	6,32	1,26	2,65	
zone 2	G+Q+EX	3,24	52,65	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-537,19	559,24	0,96	1,00	38,69	7,74	2,88	(2×4T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-75,15	-52,45	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	290,51	-801,72	0,52	1,44	11,36	2,27	1,56	
	G+Q+EY	-7,00	2,06	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-45,32	-2,32	1,86	0,10	6,34	1,27	5,59	
	G+Q-EY	-64,90	-1,86	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-201,36	-240,15	0,89	1,07	13,50	2,70	2,68	
	08G+EX	13,12	52,62	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-503,24	592,52	0,90	1,06	33,97	6,79	2,70	
	08G-EX	-65,26	-52,48	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	324,46	-768,43	0,58	1,38	14,16	2,83	1,75	
	08G+EY	2,88	2,03	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-11,37	30,96	0,53	1,43	0,45	0,09	1,58	
	08G-EY	-55,02	-1,89	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-167,41	-206,87	0,88	1,08	11,01	2,20	2,63	
zone 1	G+Q+EX	14,16	81,09	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-796,19	892,53	0,92	1,04	55,18	11,04	2,77	(2×4T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-101,55	-81,20	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	500,06	-1190,88	0,58	1,38	21,74	4,35	1,74	
	G+Q+EY	-4,08	2,96	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-44,68	16,93	1,42	0,54	4,76	0,95	4,26	
	G+Q-EY	-87,57	-2,86	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-268,11	-327,58	0,88	1,08	17,74	3,55	2,65	
	08G+EX	26,14	81,12	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-755,75	933,60	0,88	1,08	49,70	9,94	2,63	
	08G-EX	-89,57	-81,17	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	540,50	-1149,81	0,63	1,33	25,41	5,08	1,88	
	08G+EY	6,71	2,88	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-7,15	52,82	0,23	1,73	0,13	0,03	0,70	
	08G-EY	-75,59	-2,83	1,96	0,15	0,29	0,09	0,98	-227,68	-286,51	0,87	1,09	14,82	2,96	2,60	

✓ Voile (10;V16)

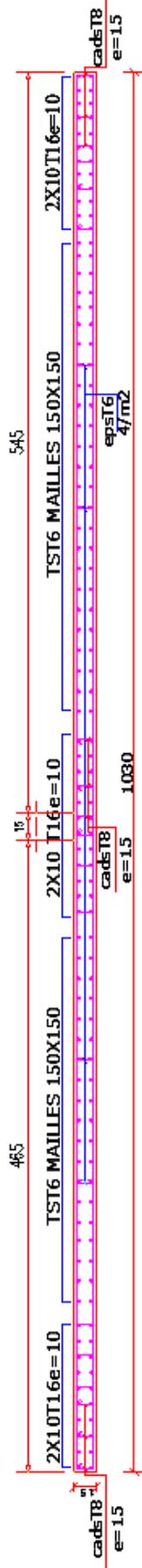
	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	$\sigma_1(t/m^2)$	$\sigma_2(t/m^2)$	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-150,33	-7,507	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-831,12	-2252,57	0,18	0,47	10,92	2,18	0,53	(2×7T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-150,34	-7,555	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-826,68	-2257,21	0,17	0,48	10,80	2,16	0,52	
	G+Q+EY	-150,33	-7,386	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-842,58	-2241,11	0,18	0,47	11,22	2,24	0,53	
	G+Q-EY	-150,33	-7,671	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-815,60	-2268,09	0,17	0,48	10,52	2,10	0,52	
	08G+EX	-107,08	-4,992	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-625,64	-1570,87	0,19	0,46	8,69	1,74	0,56	
	08G-EX	-107,09	-5,04	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-621,20	-1575,52	0,18	0,47	8,56	1,71	0,55	
	08G+EY	-107,08	-4,872	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-637,00	-1559,51	0,19	0,46	9,01	1,80	0,57	
	08G-EY	-107,08	-5,156	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-610,11	-1586,40	0,18	0,47	8,26	1,65	0,54	
zone 3	G+Q+EX	-392,32	-5,511	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-3502,04	-4545,55	0,28	0,37	74,29	14,86	0,85	(2×7T10) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-634,34	-5,725	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-5964,04	-7048,06	0,30	0,35	133,26	26,65	0,89	
	G+Q+EY	-392,33	-4,368	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-3610,36	-4437,44	0,29	0,36	78,96	15,79	0,87	
	G+Q-EY	-634,33	-8,354	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-5715,04	-7296,86	0,29	0,36	122,37	24,47	0,86	
	08G+EX	-261,12	-3,448	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-2351,72	-3004,59	0,29	0,36	50,34	10,07	0,86	
	08G-EX	-415,19	-3,663	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-3911,57	-4605,15	0,30	0,35	87,58	17,52	0,90	
	08G+EY	-261,13	-2,305	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-2460,03	-2896,48	0,30	0,35	55,08	11,02	0,90	
	08G-EY	-415,18	-6,292	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-3662,56	-4853,95	0,28	0,37	76,79	15,36	0,84	
zone 2	G+Q+EX	-876,31	-5,368	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-8479,58	-9496,01	0,31	0,34	195,00	39,00	0,92	(2×7T12) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-876,35	-5,998	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-8420,35	-9556,06	0,30	0,35	192,28	38,46	0,91	
	G+Q+EY	-755,33	-1,795	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-7577,03	-7916,92	0,32	0,33	180,64	36,13	0,95	
	G+Q-EY	-997,34	-11,517	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-9138,76	-11319,50	0,29	0,36	199,01	39,80	0,87	
	08G+EX	-569,22	-3,255	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-5529,99	-6146,32	0,31	0,34	127,68	25,54	0,92	
	08G-EX	-569,25	-3,884	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-5470,75	-6206,18	0,30	0,35	124,95	24,99	0,91	
	08G+EY	-646,25	2,696	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-6883,45	-6372,96	0,34	0,31	174,25	34,85	1,01	
	08G-EY	-646,26	-9,492	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-5729,66	-7526,96	0,28	0,37	120,73	24,15	0,84	
zone 1	G+Q+EX	-1118,31	-6,15	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-10887,60	-12052,09	0,31	0,34	251,91	50,38	0,93	(2×7T14) e = 10 + (2× TSφ6) e = 15
	G+Q-EX	-1118,35	-6,958	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-10811,51	-12129,00	0,31	0,34	248,40	49,68	0,92	
	G+Q+EY	-1239,33	9,604	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-13620,33	-11801,82	0,35	0,30	355,74	71,15	1,04	
	G+Q-EY	-1239,34	-15,06	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-11285,38	-14136,98	0,29	0,36	244,23	48,85	0,87	
	08G+EX	-723,26	-3,711	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-7066,71	-7769,39	0,31	0,34	164,09	32,82	0,93	
	08G-EX	-723,3	-4,518	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-6990,72	-7846,20	0,31	0,34	160,57	32,11	0,92	
	08G+EY	-800,3	10,628	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-9214,41	-7202,00	0,36	0,29	252,13	50,43	1,09	
	08G-EY	-800,31	-14,036	0,65	0,15	0,10	0,0034	0,33	-6879,46	-9537,16	0,27	0,38	140,54	28,11	0,82	

✓ Voile (V38)

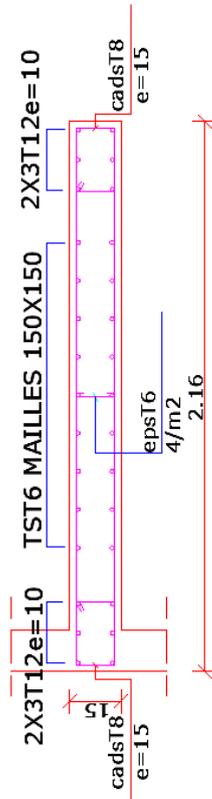
	les combinaisons	N(t)	M(t.m)	L(m)	e(m)	B (m ²)	I (m ⁴)	V=V' (m)	$\sigma_1(t/m^2)$	$\sigma_2(t/m^2)$	Lt(m)	Lc(m)	Nt(t)	Av cal (cm ²)	Amin	choix
zone 4	G+Q+EX	-86,15	943,90	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-1512,35	1291,03	2,80	2,39	317,58	63,52	8,40	(2×6T10) e = 10 + (2× TSφ8) e = 15
	G+Q-EX	-87,48	-971,11	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	1329,72	-1554,47	2,39	2,80	238,63	47,73	7,18	
	G+Q+EY	-8,33	4,70	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-17,68	-3,73	4,29	0,90	5,69	1,14	12,86	
	G+Q-EY	-130,38	-23,79	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-132,14	-202,80	2,05	3,14	20,29	4,06	6,14	
	08G+EX	-61,41	947,61	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-1486,07	1328,32	2,74	2,45	305,44	61,09	8,22	
	08G-EX	-62,74	-967,40	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	1355,99	-1517,18	2,45	2,74	249,10	49,82	7,35	
	08G+EY	-6,24	4,80	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-15,14	-0,90	4,90	0,29	5,56	1,11	14,70	
	08G-EY	-105,64	-20,08	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-105,87	-165,51	2,02	3,17	16,08	3,22	6,07	
zone 3	G+Q+EX	-193,05	3275,19	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-5111,63	4615,67	2,73	2,46	1045,58	209,12	8,18	(2×6T12) e = 10 + (2× TSφ8) e = 15
	G+Q-EX	-194,82	-3319,24	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	4678,81	-5179,31	2,46	2,73	864,38	172,88	7,39	
	G+Q+EY	-48,59	-6,20	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-53,20	-71,63	2,21	2,98	8,83	1,77	6,64	
	G+Q-EY	-342,83	-39,26	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-382,07	-498,69	2,25	2,94	64,51	12,90	6,75	
	08G+EX	-134,58	3282,11	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-5046,79	4701,06	2,69	2,50	1017,07	203,41	8,06	
	08G-EX	-136,34	-3312,32	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	4743,65	-5093,92	2,50	2,69	890,36	178,07	7,51	
	08G+EY	13,44	2,14	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	14,09	20,43	2,12	3,07	2,24	0,45	6,35	
	08G-EY	-284,36	-32,34	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-317,23	-413,30	2,25	2,94	53,62	10,72	6,76	
zone 2	G+Q+EX	-299,92	6269,51	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-9695,45	8924,94	2,70	2,49	1965,06	393,01	8,11	(2×6T14) e = 10 + (2× TSφ8) e = 15
	G+Q-EX	-304,25	-6331,16	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	9010,92	-9792,56	2,49	2,70	1680,85	336,17	7,46	
	G+Q+EY	-38,57	-3,32	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-44,61	-54,48	2,34	2,85	7,82	1,56	7,01	
	G+Q-EY	-580,48	-61,97	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-653,61	-837,66	2,27	2,92	111,51	22,30	6,82	
	08G+EX	-207,28	6279,74	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-9591,64	9059,13	2,67	2,52	1920,07	384,01	8,01	
	08G-EX	-211,61	-6320,93	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	9114,73	-9658,37	2,52	2,67	1722,58	344,52	7,56	
	08G+EY	68,94	10,55	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	72,89	104,22	2,14	3,05	11,68	2,34	6,41	
	08G-EY	-487,84	-51,74	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-549,81	-703,46	2,28	2,91	93,89	18,78	6,83	
zone 1	G+Q+EX	-374,77	8109,08	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-12523,36	11560,55	2,70	2,49	2534,80	506,96	8,10	(2×6T16) e = 10 + (2× TSφ8) e = 15
	G+Q-EX	-382,56	-8183,45	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	11660,98	-12643,79	2,49	2,70	2177,75	435,55	7,47	
	G+Q+EY	-36,86	1,59	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-49,71	-44,99	2,72	2,47	10,16	2,03	8,17	
	G+Q-EY	-720,47	-75,96	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-812,66	-1038,25	2,28	2,91	138,89	27,78	6,84	
	08G+EX	-255,41	8121,70	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-12388,77	11732,61	2,67	2,52	2476,75	495,35	8,00	
	08G-EX	-263,20	-8170,83	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	11795,56	-12471,73	2,52	2,67	2231,75	446,35	7,57	
	08G+EY	82,50	14,21	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	84,87	127,07	2,08	3,11	13,23	2,65	6,23	
	08G-EY	-601,11	-63,34	5,19	0,15	0,78	1,75	2,60	-678,08	-866,19	2,28	2,91	115,90	23,18	6,84	

Schéma du ferrailage de quelques voiles

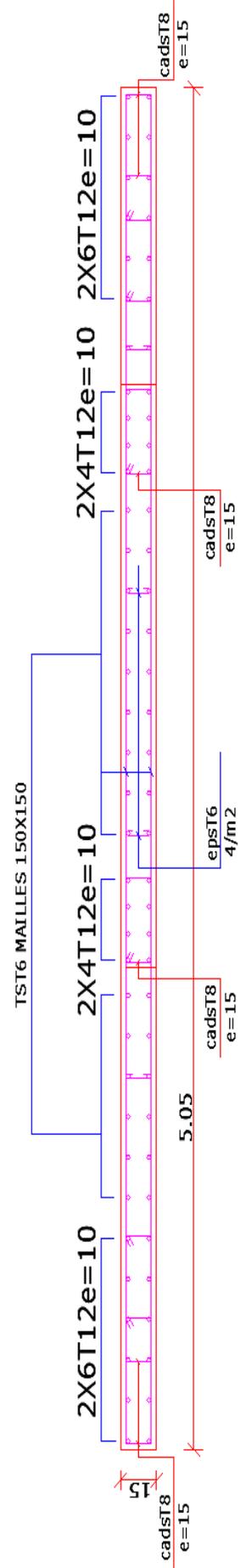
- Voile (V1; V23)



- Voile (V34; V36)



- Voile (V11)



Chapitre VIII



Etude de l'infrastructure

Etude de l'infrastructure

VIII.1- Introduction

Les fondations d'une construction sont constituées par les parties de l'ouvrage qui sont en contact avec le sol auquel elles transmettent les charges de la superstructure ; elles constituent donc la partie essentielle de l'ouvrage puisque de leur bonne conception et réalisation découle la bonne tenue de l'ensemble.

Les éléments de fondation transmettent les charges au sol, soit directement (cas des semelles reposant sur le sol ou cas des radiers), soit par l'intermédiaire d'autres organes (cas des semelles sur pieux par exemple).

VIII.2- Caractéristiques mécanique du sol

- ✓ contrainte admissible : $\sigma_{SOL} = 2\text{bars}$
- ✓ la profondeur d'ancrage $H = 2.5\text{m}$

VIII.3- Choix de type de fondation

Pour le choix de type de fondation à prévoir ; on est amenée à prendre en considération :

- ✓ Le poids de la structure ;
- ✓ La capacité portante du sol ;
- ✓ L'économie dans la réalisation ;
- ✓ La facilité et la rapidité d'exécution.

On peut avoir :

- Des **fondations superficielles** (lorsque les couches de terrain capable de supporter l'ouvrage sont à une faible profondeur)
- Des **fondations profondes** (lorsque les couches de terrain capable de supporter l'ouvrage sont à une grande profondeur).

Pour cela d'autres vérifications ont été établies notamment des semelles filantes croisées car il y a des voiles importants dans les deux directions qui vont supporter des sollicitations sismiques importantes vis-à-vis des moments de flexion et des efforts normaux.

VIII.4- Classification des fondations :

Pour les fondations, on distingue :

➤ **Fondations superficielles :**

- **Les semelles isolées :** Dont les dimensions en plan B et L sont toutes deux au plus de quelques mètres ; cette catégorie inclut les semelles carrées ($B/L = 1$) et les semelles Circulaires (de diamètre B).
- **Les semelles filantes :** Généralement de largeur B modeste (au plus quelques mètres) et de grande longueur L ($L/B > 10$).
- **Les radiers ou dallages :** de dimensions B et L importantes ; cette catégorie inclut les radiers généraux

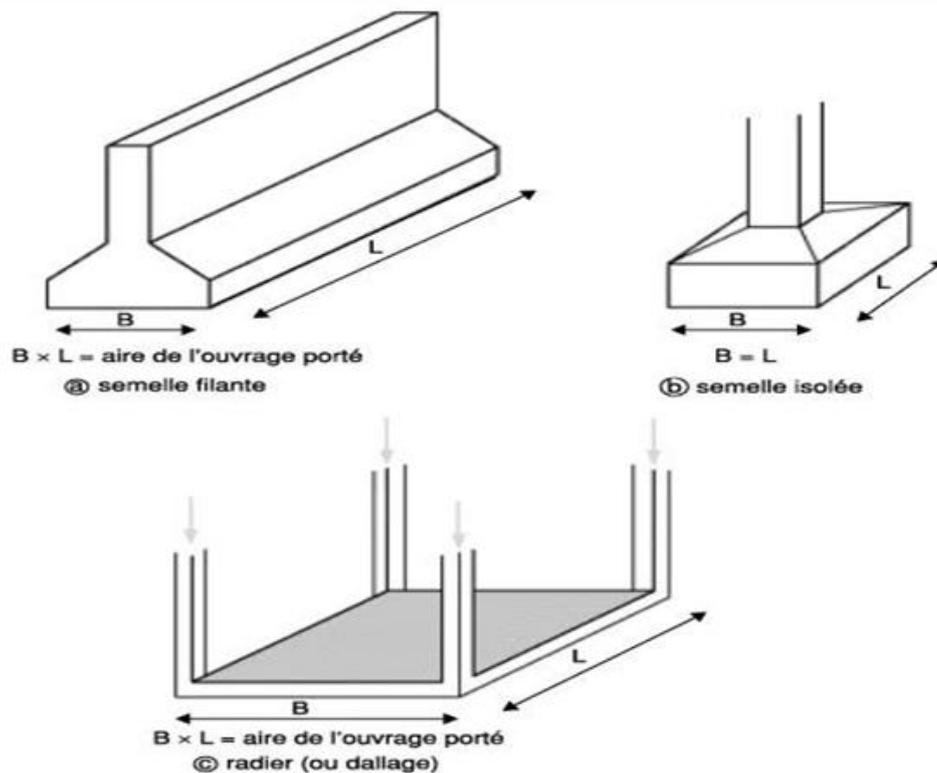


Figure VII.1. Les types de fondation superficielle

VIII.5- Semelles filantes :

L'effort normal supporté par la semelle filante est la somme des efforts normaux de tous les voiles qui se trouve dans la même ligne.

On doit vérifier que: $\sigma_{sol} \geq N/S$

$N = \sum N_i$ de chaque file de voiles

$S = B \times L$

B : Largeur de la semelle.

L : Longueur de la file considérée.

$\Rightarrow B \geq N / (L \times \sigma_{sol})$

Tableau. VIII.1: Sections des semelles filantes

Files	N(kN)	L(m)	B(m)	B choisie (m)	S(m ²)
1	3167,49	10,3	1,54	1,60	15,84
2	4630,94	10,3	2,25	2,30	23,15
3	5525,07	7,5	3,68	3,70	27,63
4	2392,48	4,45	2,69	2,70	11,96
5	10686,94	9,35	5,71	5,80	53,43
6	1820,82	4,45	2,05	2,10	9,10
7	6374,55	9,35	3,41	3,50	31,87
8	2315,67	5,2	2,23	2,35	11,58
9	2097	5,7	1,84	1,90	10,49
10	1325,03	3,95	1,68	1,70	6,63
11	3576,88	6,2	2,88	2,90	17,88
12	714,13	2,16	1,65	1,70	3,57
13	1698,77	5,05	1,68	1,70	8,49
14	2582,54	5,2	2,48	2,50	12,91
15	6374,55	9,35	3,41	3,50	31,87
16	1820,82	4,45	2,05	2,10	9,10
17	10686,94	9,35	5,71	5,80	53,43
18	2392,48	4,45	2,69	2,70	11,96
19	5525,07	7,5	3,68	3,70	27,63
20	4630,94	10,3	2,25	2,30	23,15
21	3188,68	10,3	1,55	1,60	15,94

- La somme des surfaces des semelles = 417,68m²
- La surface du bâtiment = 452, m²

✳ **Conclusion**

Les semelles filantes son encombrées, c.-à-d la somme des surfaces des semelles est supérieure à 50% de la surface de l'ouvrage

Donc il est recommandé d'opter pour un radier général.

VIII.6- Radier général

Un radier est une dalle pleine réalisée sous toute la surface de la construction. Cette dalle peut être massive (de forte épaisseur) ou nervurée ; dans ce cas la dalle est mince mais elle est raidie par des nervures croisées.

Dans notre cas, on optera pour un radier nervuré.

L'effort normal supporté par le radier est la somme des efforts normaux de tous les poteaux.

VIII.6.1- Pré dimensionnement du radier

VIII.6.1.1- Condition forfaitaire :

$$\frac{L_{max}}{25} \leq h1 \leq \frac{L_{max}}{20}$$

Avec :

L_{max} : La longueur maximale entre les axes des voiles.

On a : $L_{max} = 10.75$ m

$43 \text{ cm} \leq h1 \leq 53.75 \text{ cm}$

On adopte : **$h1 = 48 \text{ cm}$**

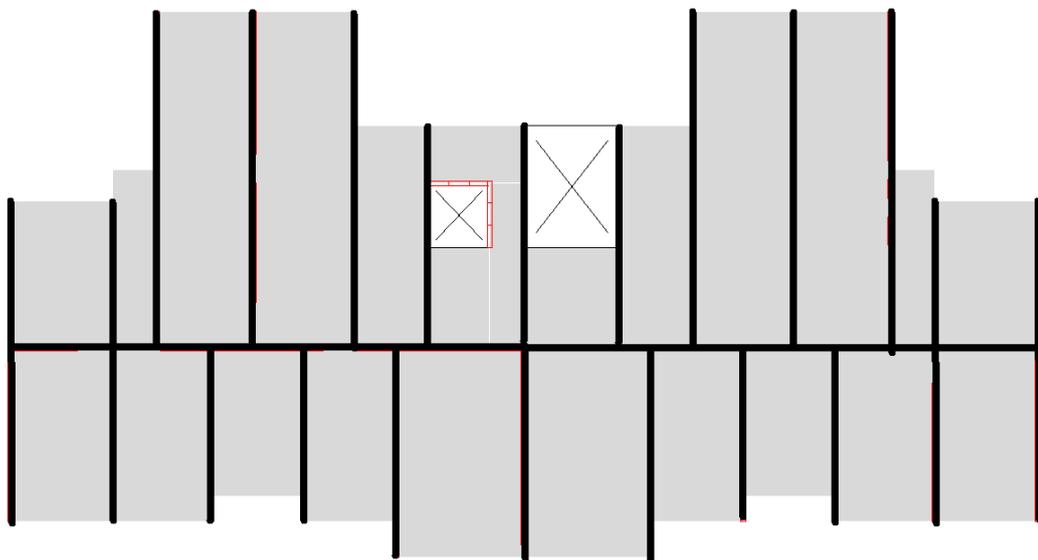


Figure VIII.2 : Disposition des panneaux du radier

VIII.6.1.2- Condition de cisaillement

On doit vérifier que :

$$\tau_u = \frac{T_u}{bd} \leq \bar{\tau}_u = \text{Min} (0.1f_{c28}; 4 \text{ MPa}) = 2.5 \text{ MPa}$$

Avec

$$T_u = \frac{qL}{2} ; \quad q = \frac{N_u}{S_{radier}} \times 1ml$$

$$N_u = 95429,63 \text{ kn}$$

$$S_{radier} = 452 ; 2 \text{ m}^2$$

$$\tau_u = \frac{qL}{2bd} = \frac{N_u L \cdot 1ml}{2S_{radier} \cdot b \cdot d} = \frac{N_u L}{2S_{radier} \cdot b \cdot (0,9h)} \leq \bar{\tau}$$

$$h_2 \geq \frac{N_u L \cdot 1ml}{2S_{radier} \cdot b \cdot (0,9\bar{\tau})} = \mathbf{51.98 \text{ cm}^2}$$

On prend : $h_2 = 60 \text{ cm}^2$

✱ **Conclusion**

$$h \geq \text{Max}(h_1 ; h_2) = 60 \text{ cm}$$

On adopte : $h_{rad} = 60 \text{ cm}$

VIII.7- Calcul des nervures

VIII.7.1- Condition forfaitaire

La hauteur des nervures se calcule par la formule de la flèche

$$\frac{L_{max}}{9} \leq h_1 \leq \frac{L_{max}}{6}$$

On a : $L_{max} = 5,15 \text{ m}$

$$\Rightarrow 57.22 \text{ cm} \leq h_1 \leq 85.83 \text{ cm} \quad \text{On adopte : } h_1 = 70 \text{ cm}$$

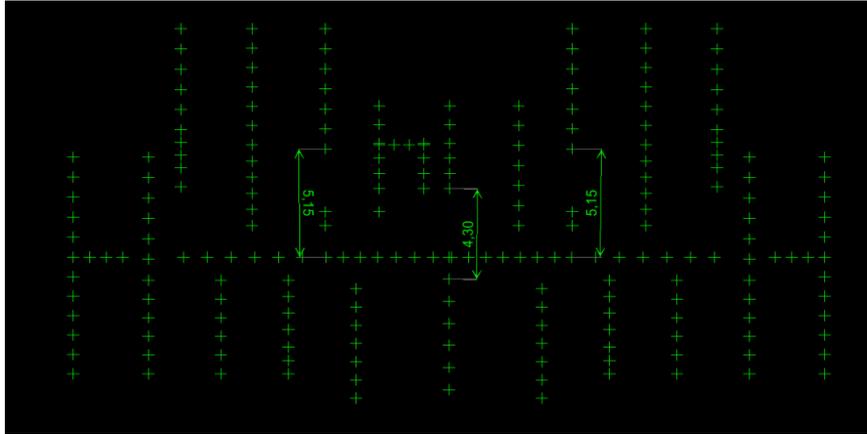


Figure VIII.3 : Détail des longueues des nervures

VIII.7.2- Condition de la raideur :

Pour étudier la raideur d'une semelle continue (nervure) sous poteaux, nous utilisons la théorie de la poutre sur sol élastique.

L'expression de la longueur élastique est donnée par :

$$L_e = \sqrt[4]{\frac{4EI}{Kb}}$$

Avec :

I: Inertie de la dalle du radier (ou de la nervure), on prenant une bande de 1m.

E: est le module d'élasticité du béton ($E_i = 320000 \text{ Kg/cm}^2$)

b: La largeur

K: Coefficient de raideur du sol.

$$0.5 \leq K \leq 12 \text{ [Kg/cm}^3\text{]}$$

On pourra par exemple adopter pour K les valeurs suivantes :

- ✓ $K = 0.5 \text{ [Kg cm}^3\text{]}$ Pour un très mauvais sol.
- ✓ $K = 4 \text{ [Kg /cm}^3\text{]}$ Pour un sol moyen (contraintes admissible 2 bars).
- ✓ $K = 12 \text{ [Kg /cm}^3\text{]}$ Pour un très bon sol

∴ Si les charges sont transmises à la poutre (ici nervure ou dalle du radier), par l'intermédiaire de poteaux de largeur a non négligeable, on pourra admettre la répartition linéaire des contraintes du sol sur une longueur totale de la semelle égale à :

$$\frac{\pi}{2} L_e + a$$

∴ Si l'entre axe des poteaux est inférieur à cette valeur, la poutre se calcule, alors comme une poutre continue (nervure) soumise à la réaction du sol (répartition linéaire).

Le projecteur pourra généralement choisir une section de poutre (hauteur de la semelle) telle que cette condition soit remplie.

▪ Si l'entre axe des poteaux est supérieur à $\pi/2L_e + a$ le calcul devra être effectué conformément à la théorie de la poutre sur sol élastique.

$$\text{On veut que: } \frac{\pi}{2} L_e + a \geq l_{\text{entre axe}}$$

$$h_2 \geq \sqrt[3]{\frac{3K \left(\frac{2L_{\max}}{\pi} \right)^4}{E}} \Rightarrow h_2 \geq 23.04 \text{ cm}$$

On adopte : $h_2 = 30 \text{ cm}$

Donc : $h_{\text{ner}} \geq \max(h_1, h_2) = 70 \text{ cm}$

On prend : $h_{\text{ner}} = 70 \text{ cm}$

VIII.7.3- Condition de coffrage:

$$b \geq \frac{L_{\max}}{10} = \frac{515}{10} = 51,5 \text{ cm}$$

Donc : $b = 55 \text{ cm}$ dans les deux sens (x-x et y-y)

* Résumé :

- Epaisseur de la dalle du radier $h = 60 \text{ cm}$
- Les dimensions de la nervure $\begin{cases} h_N = 70 \text{ cm} \\ b = 55 \text{ cm} \end{cases}$

VIII.8- Vérification de la stabilité du radier :

Il est très important d'assurer la stabilité au renversement de cet ouvrage qui est dû aux efforts horizontaux.

Le rapport $\frac{M_s}{M_R}$ doit être supérieur au coefficient de sécurité $1,5 \left(\frac{M_s}{M_R} > 1,5 \right)$

Avec:

M_s : Moment stabilisateur sous l'effet du poids propre.

M_R : Moment de renversement dû aux forces sismique.

Avec:

$$M_R = \sum M_0 + V_0 h$$

M_0 : Moment à la base de la structure.

V_0 : L'effort tranchant à la base de la structure.

h : Profondeur de l'ouvrage de la structure.

$h = \text{ancrage du radier} = 2.50 \text{ m}$.

• **Moment stabilisant M_s**

La seule action qui stabilise le bâtiment contre le renversement est celle qui est due au poids de l'ouvrage

$$M_s = N_x X_G \text{ ou } M_s = N_y Y_G \text{ (selon le sens)}$$

N_1 : Poids propre de la structure.

N_2 : Poids propre du radier.

N_3 : poids propre du nervures

$$N_1 = 62270.69 \text{ KN}$$

$$N_2 = \rho_b (S_{rad} \times h_{rad}) = 451,96 \text{ KN}$$

$$N_3 = (0,6 \times 0,6 \times 25 \times 5,15 \times 2) + (0,6 \times 0,6 \times 4,3) = 131,4 \text{ KN}$$

$$N = N_1 + N_2 + N_3 = 69181.49 \text{ kN}$$

Donc : $N = 69181.49 \text{ kN}$

Avec : $M_R = \sum M_0 + V_0 h$

$$M_{rx} = 117131,04 + 5694,99 \times 2,5 = 131368,518 \text{ Kn.m}$$

$$M_{ry} = 137406,73 + 6390,40 \times 2.5 = 153382,73 \text{ Kn .m}$$

$$M_s = N_x X_G \text{ ou } M_s = N_y Y_G \text{ (selon le sens)}$$

$$M_{sx} = 69181,49 \times 16.44 = 1137343,69 \text{ Kn.m}$$

$$M_{sy} = 69181,49 \times 6.96 = 481503,17 \text{ Kn.m}$$

$$M_{sx} / M_{rx} = 8,65 > 1.5$$

$$M_{sy} / M_{ry} = 3,13 > 1.5$$

* **conclusion:**

Le rapport du moment de stabilité et du moment de renversement est supérieur à 1,5; donc notre structure est stable dans les deux sens.

VIII.9- Calcul des contraintes :

Les contraintes du sol sont données par $N_{ses} = 69440,27kN$

VIII.9.1- Sollicitation du premier genre :

À l'ELS $\sigma_{ser} = \frac{N_{ser}}{S_{rad}} = 153,64kN/m^2$

$\sigma_{ser} = 153,64kN/m^2 < \sigma_{sol} = 200kN/m^2 \dots\dots\dots V\acute{e}rifi\acute{e}e$

VIII.9.2- Sollicitation du second genre :

On doit v\erifier les contraintes sous le radier ($\sigma_1 ; \sigma_2$)

Avec :

$\sigma_1 = \frac{N}{S_{rad}} + \frac{M}{I}V$

$\sigma_2 = \frac{N}{S_{rad}} - \frac{M}{I}V$

M : est le moment de renversement

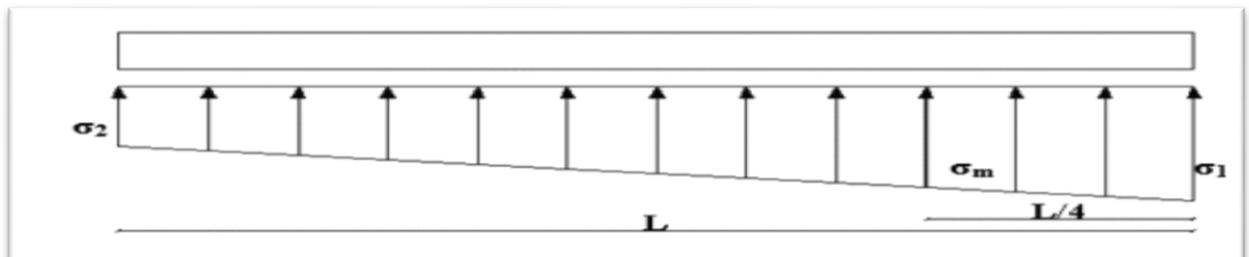


Figure VIII.4 : Contraintes sous le radier.

On v\erifier que :

σ_1 Ne doit pas d\epasser $1,5\sigma_{sol}$

σ_2 Reste toujours positive pour \eviter des tractions sous le radier.

$\sigma\left(\frac{L}{4}\right) = \frac{3\sigma_1 + \sigma_2}{4}$ Reste toujours inf\erieur \`a $1,33 \sigma_{sol}$.

\therefore Caractéristiques g\eom\etriques du radier :

✓ **Position du centre de gravit\e:**

$x_G = 16,4541m$

$y_G = 6,67m$

✓ **Moments d'inertie:**

$$I_{xx} = 8505,8m^4$$

$$I_{yy} = 37264,1 m^4$$

on doit vérifier que :

ELU : $\sigma_m \leq 1,33 \sigma_{sol} \Rightarrow \sigma_m = 232,27KN/m^2 \leq 266KN/m^2 \Rightarrow$ donc vérifier .

ELS : $\sigma_m \leq \sigma_{sol} \Rightarrow \sigma_m = 222,29KN/m^2 \geq 200KN/m^2 \Rightarrow$ N'pas vérifier

Tableau VIII.2 : Les contraintes ,

	ELU			ELS		
	$\sigma_1(Kn/m^2)$	$\sigma_2(Kn/m^2)$	$\sigma_m(Kn/m^2)$	$\sigma_1(Kn/m^2)$	$\sigma_2(Kn/m^2)$	$\sigma_m(Kn/m^2)$
X-X	253,45	168,72	232,27	184,39	122,78	168,98
Y-Y	229,5	201,92	222,61	267,40	86,98	222,29

VIII.10- Ferrailage du radier :

➤ **Ferrailage de la dalle :**

- Le calcul se fait pour une bande de 1m de largeur en flexion simple.
- La fissuration est considérée comme préjudiciable.

VIII.10.1- Détermination des efforts :

Charge pour une bande de 1m : $q = \sigma m \left(\frac{L}{4}\right) .1m$

Le panneau le plus sollicité : $Lx = 3,37m ; Ly = 10,75m$

$$\xi = \frac{L_x - 3,37}{L_y - 10,75} = 0,31$$

⇒ la dalle porte suivant une seul direction

ELU : $q_u = \sigma m \left(\frac{L}{4}\right) .1m = 232,27KN/ml$

ELS : $q_{ser} = \sigma m \left(\frac{L}{4}\right) .1m = 222,29KN/ml$

Tableau VIII.3: Calcul des moments

	LX(m)	LY(m)	LX/LY	M0(KN.m)	Ma(KN.m)	Mt(KN.m)
ELU	3,37	10,75	0,31	329,73	164,87	280,87
ELS	3,37	10,75	0,31	315,56	157,78	268,23

Tableau VIII. 4:Ferrailage a ELU

	M_u (KN.m)	A_s (cm)	choix	A_s
Travée	280,78	13,89	7T16	14,07
Appui	164,87	8,01	7T14	10,78

- **Espacement:**

$$Esp \leq \text{Min}(3h; 33\text{cm}) \Rightarrow S_t \leq \text{Min}(90\text{cm}; 33\text{cm}) = 33\text{cm}$$

Sens x-x :

$$S_t = \frac{100}{8} = 12,5 \text{ cm} < 33\text{cm}$$

On prend $S_t=10\text{cm}$

VIII.11- Vérifications nécessaires :

VIII.11.1- Condition de non fragilité :

$$A_s^{\min} = 0,23bd \frac{f_{t28}}{f_e} = 5,23\text{cm}^2 < 10,78\text{cm}^2$$

✱ **Remarque :**

La vérification des contraintes à l'ELS n'est pas vérifiée donc on doit augmenter les sections de ferrillages.

VIII.11.2- Vérification des contraintes à l'ELS :

Tableau VIII.5 :Vérification des contraintes

	M_{ser} (kNm)	$A_s(\text{cm}^2)$	σ_{bc} (MPa)	$\bar{\sigma}_{bc}$ (MPa)	σ_s (MPa)	$\bar{\sigma}_s$ (MPa)	Vérification
Travée	188,95	13,89	7,06	15	42,21	201,63	OK
Appuis	111,15	8,01	6,1	15	25,19	201,63	OK

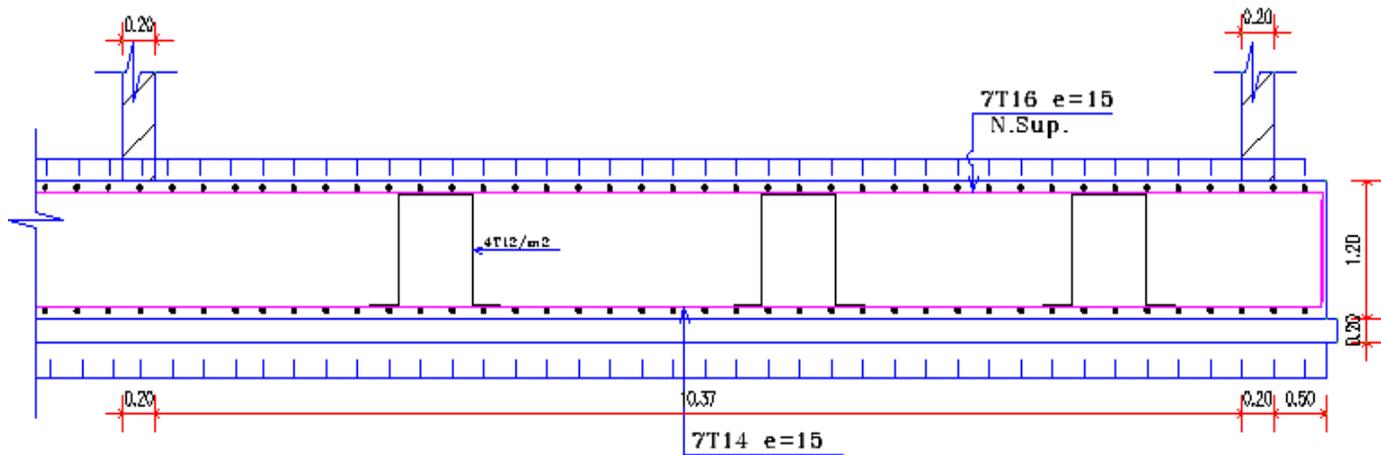


Figure VIII.5 : Schéma de ferrailage du radier

VIII.12- Ferrailage du Nervure 55×70 :

VIII.12.1- Calcul des efforts :

Pour le calcul des efforts, on utilise la méthode forfaitaire(BAEL91 modifier 99[1]).

$$\text{On a : } M_0 = \frac{PL^2}{8}$$

En travée : $M_t = 0,85M_0$

Sur appuis : $M_r = 0,50M_0$

VIII.12.2- Calcul des armatures :

$b=55\text{cm}$; $h=70\text{cm}$; $d=63\text{cm}$

- Sens (y-y) :

$L=5,15\text{m}$; $P=232,9\text{ kN/ml}$, $M_0 = 772,14\text{kNm}$

Tableau VIII. 6 : Ferrailage des nervures suivant y-y

	$M_u(\text{kNm})$	μ	α	β	$A_s^{\text{cal}}(\text{cm}^2)$	Choix	$A_s^{\text{adp}}(\text{cm}^2)$
Travée	656,32	0,12	0,16	0,94	25,47	10T20	31,42
Appuis	386,07	0,07	0,09	0,96	14,67	5T20	15,71

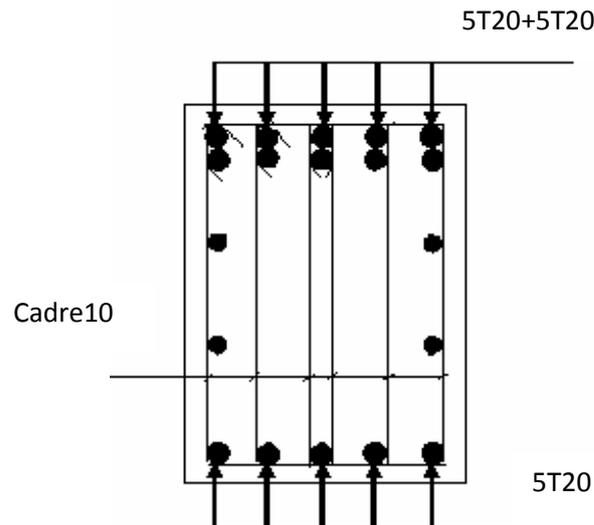


Figure VIII.6 :Ferraillage des nervures sens y-y

VIII.12.3- Vérifications nécessaires :

VIII.12.3.1- Condition de non fragilité :

$$A_s^{\min} = 0,23bd \frac{f_{t28}}{f_e} = 3,37cm^2 < 15,71cm^2 \dots\dots\dots V\acute{e}rifi\acute{e}e$$

VIII.12.3.2- Vérification des contraintes à l'ELS

Tableau VIII.7 :Vérification des contraintes

	M _{ser} (kNm)	A _s (cm ²)	σ _{bc} (MPa)	σ̄ _{bc} (MPa)	σ _s (MPa)	σ̄ _s (MPa)	Vérification
Travée	440,71	23,46	7,6	15	195,2	201,63	OK
Appuis	259,24	12,06	5,2	15	177,3	201,63	OK

VIII.12.3.3- Vérification de la contrainte tangentielle du béton : [1]

On doit vérifier que : $\tau_u < \bar{\tau}_u = \text{Min}(0,1f_{c28}; 4MPa) = 2,5MPa$

Avec :

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

$$T_u = \frac{P_u L}{2} = \frac{232,29 \times 5,15}{2} = 598,15kN$$

$$\tau_u = \frac{598,15 \cdot 10^3}{550 \times 630} = 1,73MPa < \bar{\tau}_u = 2,5MPa \dots\dots\dots V\acute{e}rifier$$

VIII.13- Ferrailage du débordement :

Le débordement est de 50 cm de chaque coté

ELS

$$\sigma_m = 222,29 \text{ KN/m}^2$$

$$q_u = 222,29 \times 1 = 222,29 \text{ KN/ml}$$

$$M_s = -q_s \times \frac{l^2}{2} = 222,29 \times \frac{0,5^2}{2} = 27,78 \text{ KN.m}$$

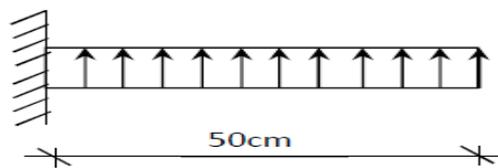


Figure VIII.7 .schéma statique du débord

Tableau.VIII.8 : vérification des contraintes

	Mser (KN.m)	As (cm ²)	As (cm ²)	I (cm ⁴)	σ b (MPa)	σ _b (MPa)	σ _s (MPa)	σ _s (MPa)
Débord	27,78	14,07	14,07	427981,21	0,84	15	39,23	240

VIII.14- Voile périphérique:

Notre voile périphérique joue le rôle d'un encastrement de la structure à la base.

D'après RPA 99 version 2003 Art [10.1.2], le voile périphérique doit avoir les caractéristiques minimales suivantes:

- Epaisseur ≥ 15 cm ;
- Les armatures sont constituées de deux nappes ;
- Le pourcentage minimum des armatures est de 0.10 % dans les deux sens horizontal et vertical ;
- Un recouvrement de 40ϕ pour les renforcements des angles.

On adopte une épaisseur $e = 20$ cm.

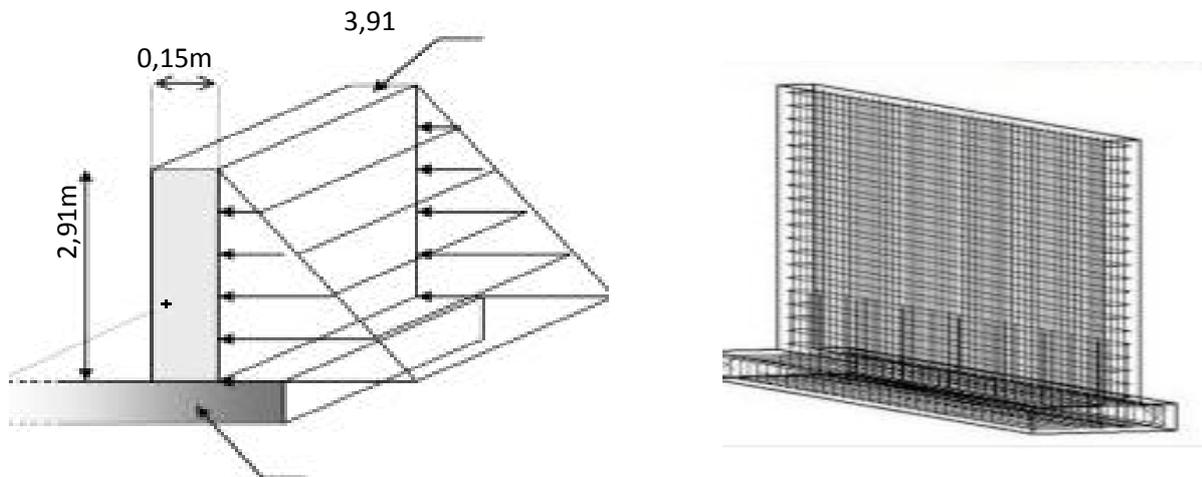


Figure VIII. 8.Voile périphérique

VIII.14.1- Evaluation des charges :

On considère le voile comme une dalle pleine reposant sur 4 appuis et qui supporte les charges horizontales dues aux poussées des terres. On considère le tronçon le plus défavorable.

$$L_x = 3,06 - 0,15 = 2,91 \text{ m} ; L_y = 3,9 \text{ m} ; e = 15 \text{ cm.}$$

Les charges et surcharges prise uniformément répartie sur une bande de 1m se situe à la base du voile (cas le plus défavorable).

Selon BAEL91 modifier 99 [1], la charge de poussées des terres est données par :

$$Q = A \gamma_h H$$

Avec

Q : Contrainte à la base sur une bande de 1m.

A : Coefficient numérique en fonction de l'angle de frottement interne.

γ_h : Poids spécifique des terres ($\gamma_h = 20 \text{ KN/m}^3$).

H : Hauteur du voile .

$$\phi = 28^\circ \Rightarrow K_a = \tan^2(\pi/4 - \phi/2) = 0,36$$

Donc :

$$Q = K_a \gamma_h H = 20,95 \text{ KN/ml} \rightarrow Q_u = 1,35Q = 28,28 \text{ KN/ml}$$

VIII.14.2- Effort dans la dalle :

$$\rho = L_x / L_y = 2,91 / 3,9 = 0,74 \geq 0,4 \rightarrow \text{La dalle travaille dans les deux sens.}$$

$$\begin{cases} \mu_x = 0,062 \\ \mu_y = 0,509 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} M_x = \mu_x \times Q_u \times L_x^2 = 14,85 \text{ kN.m} \\ M_y = \mu_y M_x = 7,56 \text{ kN.m} \end{cases}$$

- **Moment en travée :** $\begin{cases} M_{tx} = 0,85M_x \\ M_{ty} = 0,85M_y \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} M_{tx} = 22,63 \text{ kN.m} \\ M_{ty} = 6,43 \text{ kN.m} \end{cases}$

- **Moment sur appuis :** $M_{ax}=M_{ay} = 0,5M_x=10,43 \text{ kN.m}$

VIII.14.3- Calcul du ferrailage

b = 100 cm ; h = 20cm ; d = 18 cm ; $\sigma_{bc}= 14,17 \text{ MPa}$

Tableau.VIII.9 : Ferrailage du voile périphérique

	Sens	Mu(kNm)	As'(cm2)	Ascal(cm2)	Choix	Asadp(cm2)	Esp(cm)
Travée	x-x	22,63	0	4,86	6T14	9.24	20
	y-y	12,43	0	2,92	5T14	7.70	25
Appuis	x-x	10,43	0	3,07	6T12	6.79	20

VIII.14.4- Condition exigée par les RPA99/version 2003:

Le RPA préconise un pourcentage minimum de 0,1% de la section dans les deux sens disposé en deux nappes :

$$A_L \geq 0,1 \times 20 \times 100 = 2,0 \text{ cm}^2 \dots\dots\dots \text{Vérfiée}$$

$$A_T \geq 0,1 \times 20 \times 100 = 2,0 \text{ cm}^2 \dots\dots\dots \text{Vérfiée}$$

VIII.14.5- Condition de non fragilité :

Pour les dalles travaillant dans les deux sens et dont l'épaisseur est compté entre 12 et 30cm.

On a :

$$12 \text{ cm} \leq e \leq 30 \text{ cm}$$

$$h=e=20 \text{ cm} ; b=100 \text{ cm.}$$

$$\begin{cases} A_x \geq A_x^{\min} ; & A_x^{\min} = \rho_0 \left[3 - \frac{L_x}{L_y} \right] \frac{bh}{2} \\ A_y \geq A_y^{\min} ; & A_y^{\min} = \rho_0 bh \end{cases}$$

$$\rho_0=0,0008 \text{ pour les barres de FeE500}$$

$$A_x^{\min} = 0,0008 \left(3 - \frac{2,91}{3,9} \right) \frac{100.20}{2} = 1,80 \text{ cm}^2$$

$$A_y^{\min} = 0,0008 \times 100 \times 20 = 1,6 \text{ cm}^2$$

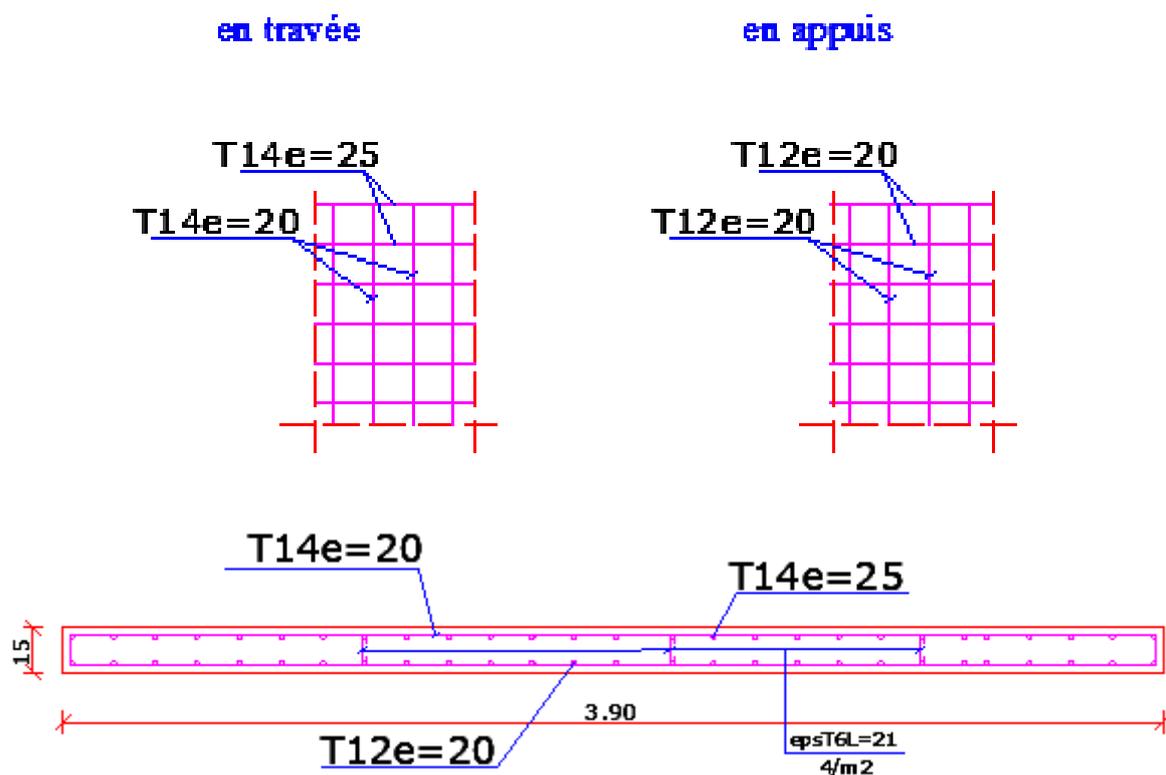
➤ **En travée :**

$$\begin{cases} A_x = 9,24 \text{ cm}^2 \rangle A_x^{\min} = 1,85 \text{ cm}^2 \\ A_y = 7,70 \text{ cm}^2 \rangle A_y^{\min} = 1,6 \text{ cm}^2 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Vérfifiée}$$

➤ **Sur appuis :**

$$\begin{cases} A_x = 56,79 \text{ cm}^2 \rangle A_x^{\min} = 1,85 \text{ cm}^2 \\ A_y = 6,79 \text{ cm}^2 \rangle A_y^{\min} = 1,6 \text{ cm}^2 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Vérfifiée}$$

Schéma de ferrailage du voile périphérique:



CONCLUSION GENERAL

Le thème de notre projet a traité l'étude d'une structure en béton armé à voile porteur, réalisé selon la technique « coffrage tunnel », nous avons pu grâce à cette étude, découvrir, apprécier et déceler les avantages et les inconvénients de ce type de structure. Après avoir achevé ce mémoire de fin d'étude, nous sommes arrivés aux conclusions suivantes

- Le choix du coefficient de comportement est un facteur important dans le calcul des structures
- Les structures en voiles porteurs (coffrage tunnel) ont une ductilité assez importante pour faire faces aux séismes par rapport aux autres structures contreventées par des voiles.
- Cette vulnérabilité se présente sous la forme d'une flexibilité à la torsion lors d'un séisme, comme l'a pu démontrer l'étude sismique. Ce qui constitue une faiblesse pour l'ouvrage en question.
- La source de cette flexibilité face à la torsion est à notre sens, due aux choix des dispositions de voiles porteurs (disposés selon le sens xx) prise lors de la conception de cet ouvrage car on peut remarquer le déséquilibre des rigidités créé par ces voiles sur le plan architectural entre sa partie inférieure et supérieure.

Par conséquent, on peut dire que certaines dispositions architecturales prises lors de la conception d'un ouvrage à voile porteur peuvent pénaliser énormément ce genre de structure en terme de résistance face aux séismes pourtant réputé pour être l'inverse.

REFERENCES

(BAEL, 1991) : Règles béton armé aux états limites 1991 BAEL 91.modifier99.

(RPA, 1999) : Règles Parasismiques Algériennes RPA99/Version 2003.

(BAEL, 1991) : DTU associés, par Jean pierre Mougins ,deuxième Edition Eyrolles.

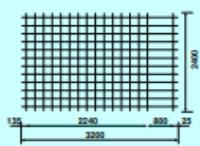
(CBA, 1993) : Règles de conception et de calcul en béton armé.

(DTR BC 2.2) : document technique réglementaire.

(ETABS) : logiciel de la modélisation de la structure.

(SOCOTEC) : logiciel de calcul de ferrailage.

ANNEXE

TREILLIS SOUDÉS DE SURFACE													
(NF A 35-024 de nuance B600A) *						(NF A 35-080-2 de nuance B500A) **							
Désignation panneau ADETS	Section S (cm ² /m)	S s (cm ² /m)	E e (mm)	D d (mm)	Abouts AV AR ad ag (mm/mm)	Nb de fils N n	Longueur L Largeur l (m)		Masse nominale (kg/m ²)	Surface 1 panneau (m ²)	Masse 1 panneau (kg)	Colisage	Masse 1 paquet (kg)
* PAF R ®	0,80	0,80 0,53	200 300	4,5 4,5	150/150 100/100	12 12	3,60 2,40		1,042	8,64	9,00	100	900
* PAF C ®	0,80	0,80 0,80	200 200	4,5 4,5	100/100 100/100	12 18	3,60 2,40		1,250	8,64	10,80	100	1080
* PAF V ®	0,99	0,80 0,99	200 160	4,5 4,5	135/25 100/100	12 16				7,68	9,60	100	960
** PAF 10 ®	1,19	1,19 1,19	200 200	5,5 5,5	100/100 100/100	12 21	4,20 2,40		1,870	10,08	18,85	70	1319

TREILLIS SOUDÉS DE STRUCTURE													
(NF A 35-080-2 de nuance B500A et/ou de nuance B500B)													
Désignation panneau ADETS	Section S (cm ² /m)	S s (cm ² /m)	E e (mm)	D d (mm)	Abouts AV AR ad ag (mm/mm)	Nb de fils N n	Longueur L Largeur l (m)		Masse nominale (kg/m ²)	Surface 1 panneau (m ²)	Masse 1 panneau (kg)	Colisage	Masse 1 paquet (kg)
ST 15 C ®	1,42	1,42 1,42	200 200	6 6	100/100 100/100	12 20	4,00 2,40		2,220	9,60	21,31	70	1492
ST 20 ®	1,89	1,89 1,28	150 300	6 7	150/150 75/75	16 20	6,00 2,40		2,487	14,40	35,81	40	1432
ST 25 ®	2,57	2,57 1,28	150 300	7 7	150/150 75/75	16 20	6,00 2,40		3,020	14,40	43,49	40	1740
ST 25 C ®	2,57	2,57 2,57	150 150	7 7	75/75 75/75	16 40	6,00 2,40		4,026	14,40	57,98	30	1739
ST 25 CS ®	2,57	2,57 2,57	150 150	7 7	75/75 75/75	16 20	3,00 2,40		4,026	7,20	28,99	40	1160
ST 35 ®	3,85	3,85 1,28	100 300	7 7	150/150 50/50	24 20	6,00 2,40		4,026	14,40	57,98	30	1739
ST 40 C ®	3,85	3,85 3,85	100 100	7 7	50/50 50/50	24 60	6,00 2,40		6,040	14,40	86,98	20	1740
ST 50 ®	5,03	5,03 1,68	100 300	8 8	150/150 50/50	24 20	6,00 2,40		5,267	14,40	75,84	20	1517
ST 50 C ®	5,03	5,03 5,03	100 100	8 8	50/50 50/50	24 60	6,00 2,40		7,900	14,40	113,76	15	1706
ST 60 ®	6,36	6,36 2,54	100 250	9 9	125/125 50/50	24 24	6,00 2,40		6,986	14,40	100,60	16	1610
ST 65 C ®	6,36	6,36 6,36	100 100	9 9	50/50 50/50	24 60	6,00 2,40		9,980	14,40	143,71	10	1437