

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Maitrise de la note de calcul : de la
conception préliminaire au plan
d'exécution.**

Guide pratique pour l'ingénieur

**Par : Professeur Abdellatif MEGNOUNIF
Université de Tlemcen**

Version 1. Février 2026

Préambule

Le présent rapport a pour but de détailler la démarche globale de conception et de calcul d'une structure en béton armé, depuis la conception préliminaire, analyse architecturale initiale, jusqu'à la production des plans d'exécution. Il s'agit de transformer une vision architecturale abstraite en une réalité constructive stable, capable de résister aux sollicitations climatiques, gravitationnelles et sismiques durant toute sa vie utile.

Concevoir une structure ne se résume pas à l'application de formules mathématiques. C'est un processus décisionnel où l'ingénieur doit répondre à trois (03) contraintes souvent divergentes :

1. **La sécurité** : Assurer la stabilité globale et prévenir tout risque de rupture (Etats Limites Ultimes – ELU).
2. **L'aptitude au service** : garantir le confort des usagers en limitant les vibrations et les déformations excessives (Etats Limites de Service – ELS)
3. **L'économie** : Rationaliser les sections de béton et les ratios d'acier pour respecter les budgets et réduire l'empreinte environnementale du projet.

La fiabilité de cette étude repose sur le respect strict des cadres réglementaires, notamment BAEL, CBA et RPA2024, qui dictent les méthodes de calcul et les coefficients de sécurité à appliquer.

Ce document est structuré pour suivre le cheminement logique du bureau d'études :

- ✓ Conception préliminaire : Discussion avec les architectes et estimation rapide des sections des différents éléments de la structure (poteaux, poutres, voiles, dalles...). Choix structurels et prédimensionnement.
- ✓ Descente des charges : inventaire des charges permanentes « G » et des surcharges d'exploitation « Q ».
- ✓ Modélisation : schématisation de la structure en utilisant un des logiciels disponibles de calcul des structures (ROBOT, ETABS, SAP...). Représentation fidèle du comportement structurel. Dans ce guide, on a utilisé ROBOT, mais la démarche reste la même avec les autres logiciels.
- ✓ Analyse des sollicitations : calcul des efforts internes des éléments de la structure (efforts normaux, efforts tranchants et moments fléchissants)
- ✓ Justifications ELU/ELS : Vérification de la résistance et de la déformation (flèche)
- ✓ Justification RPA2024
- ✓ Ferrailage : Calcul des sections d'acier et dispositions constructives des différents éléments de la structure selon BAEL et RPA2024.
- ✓ Finalisation : Etablissement des plans d'exécution et bordereaux d'acier.

Au-delà de la simple application de formules, l'objectif ultime de ce guide est d'instaurer une rigueur méthodologique qui sécurise chaque prise de décision technique. En structurant ainsi la procédure, l'ingénieur n'est plus seulement un calculateur, mais le garant de la cohérence du projet.

Etape 1 : Conception préliminaire. Finalisation de la conception architecturale

Objectif de l'étape : Fixer la solution structurelle pour la vérifier en analyse numérique.

1. Plusieurs réunions avec les architectes pour :
 - ✓ Une compatibilité structurel/architecture (Trames, portées, noyaux (escaliers, ascenseurs))
 - ✓ La validation du système porteur (Portiques autostables, voiles, mixtes...)
 - ✓ Une vérification (visuelle) de la régularité (en plan, en élévation (éviter étage faible/souple)).
2. Description du projet : Lieu, destination, dimensions...

Etape 2 : Modélisation

Objectif de l'étape : Représentation fidèle du comportement de la structure.

Etape 2 : Modélisation

La modélisation basée sur la méthode des éléments finis se fera en utilisant les logiciels de calcul des structures disponibles (SAP, ROBOT, ETABS...)

Objectif de l'étape : Représentation fidèle du comportement de la structure.

1. Hypothèses de calcul : (RPA2024 § 7. 2)

Béton

- ✓ Résistance à la compression f_{c28} et résistance à la traction f_{t28}
- ✓ Calculer $f_{bu} = \frac{0,85f_{c28}}{\theta \gamma_b}$ à l'ELU et $f_{bs} = 0,6 f_{c28}$ à l'ELS avec Contrainte normale ($\theta = 1$; $\gamma_b = 1,5$) et contrainte accidentelle ($\theta = 0,85$; $\gamma_b = 1,15$).
- ✓ Module de déformation longitudinale $E_{i28} = 11000 \sqrt[3]{f_{c28}}$

Acier

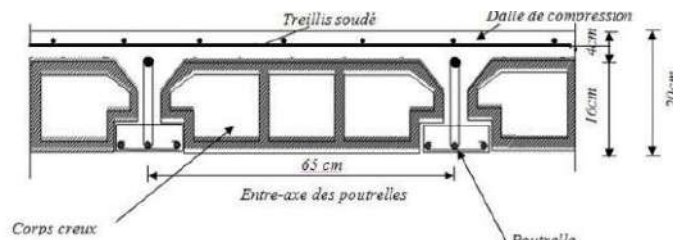
- ✓ Résistance caractéristique de calcul FeE500 ($f_e=500$ MPa) ou FeE400 ($f_e=400$ MPa)
- ✓ Sollicitations sous actions fondamentales $\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s}$ ($\gamma_s = 1,15$)
- ✓ Sollicitations sous actions accidentelles $\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s}$ ($\gamma_s = 1,0$)

2. Prédimensionnement

Permet de contrôler la faisabilité, limiter les déformations et éviter des sections irréalistes au calcul détaillé.

Objectif du prédimensionnement : Obtenir des dimensions réalistes

i) Plancher à corps creux



- $\frac{L_{max}}{25} \leq ht \leq \frac{L_{max}}{20}$ (Choisir généralement $ht \approx \frac{L_{max}}{22,5}$) avec L_{max} dans la direction de la poutrelle.

ii) Poutres/Chainages/Poutres palières

- $\frac{L_{xmax}}{15} \leq h_t \leq \frac{L_{xmax}}{10}$ (Choisir généralement $h_t \approx \frac{L_{xmax}}{12,5}$)
- $0,3h_t \leq b \leq 0,8h_t$

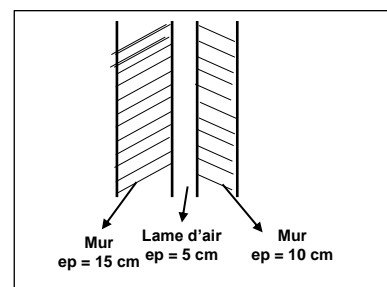
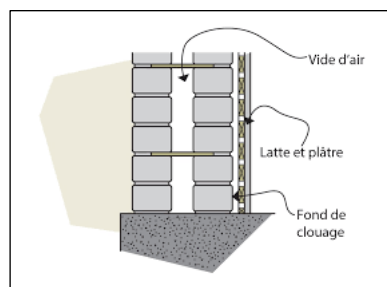
iii) Poteaux

Choisir des sections (de préférence carrées) et on les vérifie selon les recommandations RPA2024. (De préférence la même section pour tout l'étage)

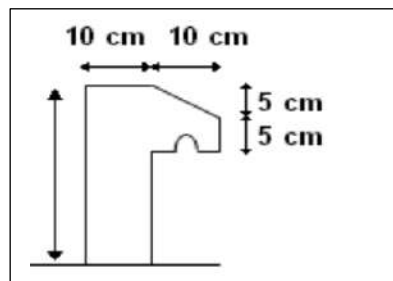
iv) Epaisseur des dalles pleines (Balcons, paliers, volées...)

Choisir une épaisseur

v) Mur périphérique (Double paroi)



vi) Acrotère (Exemple terrasse inaccessible)



3. Vérifications du coffrage selon RPA2024

i) Spécifications pour les poteaux (RPA2024 § 7. 4. 1)

- ✓ $\text{Min}(b_1, h_1) \geq 25 \text{ cm}$ en zones I, II et III
- ✓ $\text{Min}(b_1, h_1) \geq 30 \text{ cm.}$ en zones IV, V et VI
- ✓ $\text{Min}(b_1, h_1) \geq l_{cL}/20$ (qlq soit la zone)
- ✓ $1/4 < b_1/h_1 < 4$ (qlq soit la zone)

ii) Spécifications pour les poutres (RPA2024 § 7. 5. 1)

- ✓ $b \geq 20 \text{ cm}$: en zones I, II et III
- ✓ $b \geq 25 \text{ cm}$: en zones IV, V et VI
- ✓ $h \geq 30 \text{ cm}$
- ✓ $h/b \leq 4$
- ✓ $b_{max} \leq 1,5 h + b_1$

4. Descente de charges (Charges permanentes G et surcharge d'exploitation Q) (DTR B.C 2. 2)

i) Charges permanentes « G » (Exemples)

➤ *Etage courant en corps creux en béton*

Matériaux	Poids surfacique (KN/m2)
<ul style="list-style-type: none"> • Carrelage ou dallage continu • Chape en mortier de ciment (3 cm) • Enduit en ciment (2 cm) • Cloison en maçonnerie • Plancher nervuré à poutrelles continues sur plan avec entrevous (corps creux) en béton, entre axe 60 cm, montage avec table de compression (16+4) 	0,40 0,60 0,36 1,00 2,85
Total	5,21

➤ *Terrasse inaccessible en corps creux en béton*

Matériaux	Poids surfacique (KN/m2)
<ul style="list-style-type: none"> • Isolation en polystyrène (4 cm) • Forme de pente en béton dosé à 250Kg/m3 • Etanchéité multicouches + pare vapeur • Protection meuble en gravillon • Enduit en ciment (2 cm) • Plancher nervuré à poutrelles continues sur plan avec entrevous (corps creux) en béton, entre axe 60 cm, montage avec table de compression (16+4) 	0,19 2,20 0,22 1,00 0,36 2,85
Total	6,82

➤ *Dalle pleine étage courant (Balcons)*

Matériaux	Poids surfacique (KN/m2)
<ul style="list-style-type: none"> • Chape en mortier de ciment (4 cm) • Dallage céramique avec mortier de pose (2 cm) • Enduit en ciment sous plafond (1,5 cm) • Cloisons 	0,80 0,70 0,27 1,00
Total	2,77

Rem: le poids propre de la dalle pleine est pris automatiquement dans le logiciel

➤ *Dalle pleine terrasse (Haut Balcons)*

Matériaux	Poids surfacique (KN/m2)
<ul style="list-style-type: none"> • Isolation en polystyrène (4 cm) • Forme de pente en béton dosé à 250Kg/m3 • Etanchéité multicouches + pare vapeur • Protection meuble en gravillon • Enduit en ciment (2 cm) 	0,19 2,20 0,22 1,00 0,36
Total	3,97

Rem: le poids propre est pris automatiquement dans le logiciel

➤ *Charges linéaires sur poutres périphériques*

Murs DP sur étage courant. Détail charge linéaire :

- Paroi 15 cm : 1,30 KN/m2
- Paroi 10 cm : 0,90 KN/m2
- Enduit intérieur en ciment (1,5 cm) : 0,27 KN/m2
- Enduit extérieur en ciment (1,5 cm) : 0,27 KN/m2 En linéaire :
 $DP \times hauteur\ utile \times 80\%$ (ouvertures)

Murs Acrotères sur terrasse inaccessible

- Acrotère (h = 60 cm ; 25,0 KN/m3). En linéaire : 25,0 x section

ii) Charges d'exploitation

Eléments	Poids surfacique (KN/m2)
<ul style="list-style-type: none"> • Etage courant • Terrasse inaccessible • Escalier • Balcons 	1,50 1,00 2,50 3,50

5. Modélisation par ROBOT

Le modèle est un outil d'ingénierie (c'est de l'art), ce n'est pas un simple dessin. Modélisation en 3D (Géométrie, Sections (poutres, poteaux, voiles, dalles...)), conditions d'appui, avec les hypothèses de calcul (Matériaux, diaphragmes rigides, fissuration...).

i) Choix du type de la structure.

Dans ROBOT, choisit de préférence les modèles prédéfinis, qui modélisent généralement les éléments linéaires (poutres, poteaux) et les éléments coques.

ii) Configuration du projet. Dans ROBOT :

- ✓ Fixer les unités et les formats des variables (Dimensions, Force...)
- ✓ Choix des matériaux (Eurocode (FR))

- ✓ Choix des normes de conception (BAEL91 mod 99, DTU 13.12...)
- ✓ Choix des normes de charges (BAEL 91, RPA...)
- ✓ Définition des sections à utiliser (Poteau BA, Poutre BA, Dalle, Voile, Volée, Palier...)

iii) Création de la structure sur ROBOT

- ✓ Commencer par définir les lignes de construction (Définition des axes de la structure, X, Y et Z).
- ✓ Commencer à dessiner (selon les sections déjà définies). On peut commencer par les poteaux ou poutres... (Il n'y a pas de règles). Exemple, Commencer à dessiner les poteaux choisis dans le plan XZ selon les positions du coffrage (on commence par l'axe 0.0 , puis on continue avec les autres axes) puis on continue avec les poutres et les chainages.
- ✓ Introduire le plancher à corps creux. C'est un plancher qui va servir uniquement à transmettre les charges vers les poutres et les chainages, ce n'est pas un élément de résistance. Pour cela, on utilise uniquement un « Bardage ». On termine avec l'élément « Dalle » pour les balcons.
- ✓ Introduction des diaphragmes. Un diaphragme par étage. (Définir puis affecter).

Etape 3 : Analyse

Objectif de l'étape : La détermination des efforts internes (N, T et M) dans les différents éléments (poutres, poteaux, dalles, voiles, fondations...) de la structure pour le calcul du ferrailage.

Dans l'analyse, on définit et on applique les différentes charges. On a 03 types d'analyse : Statique, Modale puis Dynamique temporelle (exemple Spectrale).

1. Application des charges statiques sur le modèle « G » et « Q » pour définir les états ELU et ELS
 - ✓ Commencer par définir les cas de charges de base dans ROBOT. G puis Q.
 - ✓ Combiner les charges G et Q pour obtenir les combinaisons $ELU=1.35G+1.5Q$ et $ELS=G+Q$
 - ✓ Appliquer les charges G et Q sur les éléments de la structure. (On peut le faire sur le 1^{er} étage et on copie par la suite aux autres étages, puis on modifie ce qui doit être modifié).
 - ✓ On peut commencer par « G » pour le plancher à corps creux, les dalles (balcons), charges linéaires (double paroi) ...Même chose pour « Q ».
 - ✓ Créer les étages pour copier le niveau inférieur aux autres niveaux supérieurs. Puis modifier G et Q selon les valeurs de chaque étage (Graphiquement (plus simple) ou à travers le tableau des résultats).
2. Introduction des conditions aux limites.
 - ✓ Introduire des encastremets à tous les points de la base de la structure.
 - ✓ La modélisation est terminée. A cette étape, on peut vérifier notre modèle en lançant une analyse statique et voir s'il n'y a pas d'erreurs et d'avertissements pour passer à la prochaine étape qui est l'analyse dynamique.
 - ✓ S'il n'y a pas d'erreurs, on peut afficher certains résultats pour la vérification. Exemple, les efforts dans les éléments poteaux ou poutres choisis.
3. Définition des masses massiques et analyse modale (Dans ROBOT).

Objectif : La détermination des périodes et modes propres de vibration, nécessaires pour le calcul des réponses dynamiques.

- ✓ Commencer par choisir le type d'analyse en définissant un nouveau type, nommé « Modale ».
- ✓ Choisir les paramètres du calcul modal.
 - Nombre de modes = 10 (après on justifiera le nombre)
 - Tolérance = 0.0001
 - Nombre d'itérations = 40
 - Masse cohérente actives suivant X et Y.

- ✓ Paramètres avancés : Méthode de sous espace, valeur de l'amortissement (**RPA2024, Tableau 3.5**).
- ✓ Définition et introduction des masses sismiques selon la combinaison « **G + ψ Q** ». (**RPA2024, Tableau 4.2**). Attention à la direction de la masse (uniquement X et Y).
- ✓ En cas de non erreurs/avertissements, lancer le calcul et récupérer les résultats, surtout les périodes et modes propres de vibration. (sur Analyse modale, : **Tableaux/Modes propres**)

Cas/Mode	Fréquence [Hz]	Période [sec]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]	Masses Cumulées UZ [%]	Masse Modale UX [%]	Masse Modale UY [%]	Masse Modale UZ [%]	Tot.mas.UX [kg]	Tot.mas.UY [kg]	Tot.mas.UZ [kg]
5/ 1	1,51	0,66	68,76	0,00	0,0	68,76	0,00	0,0	871681,46	871681,46	0,0
5/ 2	1,81	0,55	68,77	82,16	0,0	0,01	82,16	0,0	871681,46	871681,46	0,0
5/ 3	1,82	0,55	79,80	82,24	0,0	11,02	0,08	0,0	871681,46	871681,46	0,0
5/ 4	4,85	0,21	91,35	82,24	0,0	11,55	0,00	0,0	871681,46	871681,46	0,0
5/ 5	5,51	0,18	91,35	93,30	0,0	0,00	11,06	0,0	871681,46	871681,46	0,0
5/ 6	5,69	0,18	91,87	93,32	0,0	0,53	0,02	0,0	871681,46	871681,46	0,0
5/ 7	9,43	0,11	96,62	93,32	0,0	4,74	0,00	0,0	871681,46	871681,46	0,0
5/ 8	10,08	0,10	96,62	97,58	0,0	0,00	4,25	0,0	871681,46	871681,46	0,0
5/ 9	10,48	0,10	97,04	97,59	0,0	0,42	0,01	0,0	871681,46	871681,46	0,0
5/ 10	14,27	0,07	98,45	97,59	0,0	1,41	0,00	0,0	871681,46	871681,46	0,0

- ✓ Vérifier l'ordre de grandeur de la période fondamentale (suivant X et Y) (Structure rigide ou flexible). De préférence de l'ordre de 1.0 à 2.0 sec (Colonne 3).
- ✓ Vérifier les masses cumulées (> 90%), suivant les 02 directions. (Dernières lignes des colonnes 4 et 5) (**RPA2024 § 4.3.3**)
- ✓ Vérifier les types de mode obtenus (avec obligatoirement une masse modale > 50%). Il faut avoir (souhaitable) :
 - Mode 1 : Flexionnel suivant X ou Y (Mx>50% et My faible ; ou bien My>50% et Mx faible) (1ère ligne des colonnes 7 et 8)
 - Mode 2 : Flexionnel suivant Y ou X (My>50% et Mx faible ; ou bien Mx>50% et My faible) (2ème ligne des colonnes 7 et 8)
 - Mode 3 : torsionnel (Mx et My faibles) (3ème ligne des colonnes 7 et 8)
- ✓ Tirer les valeurs des masses totales suivant X et Y pour le calcul MSE. (Colonnes 10 et 11).
- ✓ Visualiser les modes propres de vibration pour vérification. (sur Analyse modale, mode 1 (ou 2, 3...) : **Résultats/diagrammes barres/déformée**).

4. Analyse modale spectrale (Dans ROBOT).

Objectif : La détermination des réponses (déplacements, efforts, contraintes...) dynamiques de la structure dues à une excitation dynamique extérieure.

- Calcul de l'effort tranchant à la base par la MSE.

$$V = \lambda \cdot \frac{S_{ad}}{g} (T_0) \cdot W$$

Données du problème :

- ✓ Zone sismique (**RPA2024 § 3.1**)
- ✓ Importance de l'ouvrage (**RPA2024 § 3.4**)
- ✓ Site (**RPA2024 § 3.2**)
- ✓ Système de contreventement (**RPA2024 § 3.5**)
- ✓ % d'amortissement (**RPA2024 tableau 3.5**)

A déduire :

- ✓ Coefficient de zone « A » (RPA2024 Tableau 3.2)
- ✓ Coefficient d'importance « I » (RPA2024 Tableau 3.10)
- ✓ Type de spectre (RPA2024 § 3.3.1)
- ✓ Coefficient de comportement « R » (RPA2024 Tableau 3.17)
- ✓ S, T1, T2 et T3 (RPA2024 Tableaux 3.3 et 3.4)
- ✓ Temp (à comparer avec Tx et Ty (robot). **Tempirique** = $C_T h_N^{3/4}$ (RPA2024 § 4.2.4) (pour C_T ; RPA2024 Tableau 4.3) (dans les 02 sens X et Y)

$$T_{\text{calcul}} \text{ (Rayleigh ou numérique)} < 1.30 T_{\text{empirique}}$$

Cas	Valeur T_0 à utiliser
$T_{\text{calcul}} < 1.3 T_{\text{empirique}}$	$T_0 = T_{\text{calcul}}$
$T_{\text{calcul}} \geq 1.3 T_{\text{empirique}}$	$T_0 = 1.3 T_{\text{empirique}}$

- ✓ Coefficient de correction « λ » (RPA2024 § 4.2.3)
- ✓ Facteur de qualité « Qf », dépend de la catégorie (a), (b) ou (c) (RPA2024 § 3.8)

$$QF = 1 + \sum_1^5 Pq$$

- Régularité en plan (RPA2024 § 3.7.1.a) (a1, a2, a3 et a4)

a1 : Configuration sensiblement symétrique vis-à-vis de 02 directions orthogonale (Rigidités et masses)

a2 : A chaque niveau et pour chaque direction de calcul, la distance entre le centre des masses et le centre des rigidités ne doit pas dépasser 15% de la dimension du bâtiment, mesurée perpendiculaire à la direction de l'action sismique considérée.

De ROBOT, tirer les centres de masse (colonne 4) et de rigidité (colonne 5) par étage et calculer les différences $R(x)-G(x) < 15\% L_x$ et $R(y) - G(y) < 15\% L_y$

s/Etage	Nom	Masse [kg]	G (x,y,z) [m]	R (x,y,z) [m]	Ix [kgm2]	Iy [kgm2]	Iz [kgm2]	ex0 [m]	ey0 [m]	ex2 [m]	ey2 [m]
1/ 1	Etage 1	285816.08	9,30 5,10 2,77	9,28 3,53 2,50	4448315,42	9872847,70	13800683,51	0,02	1,57	0,0	0,0
1/ 2	Etage 2	285724.63	9,30 5,10 5,82	9,28 3,84 5,52	4456840,65	9881819,51	13799943,99	0,02	1,27	0,0	0,0
1/ 3	Etage 3	285724.63	9,30 5,10 8,88	9,28 3,83 8,58	4456815,39	9881875,61	13799724,80	0,02	1,27	0,0	0,0
1/ 4	Etage 4	294089.95	9,30 5,11 12,01	9,30 5,30 11,72	4343043,19	9647827,00	13410653,63	0,00	0,19	0,0	0,0

a3: La forme du bâtiment doit être compacte avec un rapport longueur/largeur du plancher inférieur ou égal 4 (Figure 3.8).

La somme des dimensions des parties rentrantes ou saillantes dans une direction donnée ne doit pas excéder 25% de la dimension totale des bâtiments dans cette direction. Exemple

$$0,25 < \frac{L_x}{L_y} < 4 \quad \text{et} \quad \frac{l_1+l_2}{L_y} < 0,25$$

a4: Les planchers doivent présenter une rigidité suffisante vis-à-vis de celle des contreventements verticaux pour être considérée comme indéformable dans leur plan. Dans ce cadre, la surface totale des ouvertures de plancher doit rester

inférieure à 15% de celle de ce dernier. Pour chaque plancher : $S_{\text{plancher_tot}} < 0.15$

➤ Régularité en élévation (**RPA2024 § 3.7.1.b**) (b1, b2, b3 et b4)

b1: le système de contreventement ne doit pas comporter d'élément porteur vertical discontinu, dont la charge ne se transmet pas directement à la fondation.

b2: Aussi bien la raideur que la masse des différents niveaux restent constantes ou diminuer progressivement et sans changements brusque de la base au sommet du bâtiment.

De ROBOT, tirer les masses (colonne 3) et rigidités (colonnes 6, 7 et 8) par étage et voir qu'ils sont presque constants.

Cas/Etage	Nom	Masse [kg]	G (x,y,z) [m]	R (x,y,z) [m]	Ix [kgm2]	Iy [kgm2]	Iz [kgm2]
1/ 1	Etage 1	285816,08	9,30 5,10 2,77	9,28 3,53 2,50	4448315,42	9872847,70	13800683,51
1/ 2	Etage 2	285724,63	9,30 5,10 5,82	9,28 3,84 5,52	4456840,65	9881819,51	13799943,99
1/ 3	Etage 3	285724,63	9,30 5,10 8,88	9,28 3,83 8,58	4456815,39	9881875,61	13799724,80
1/ 4	Etage 4	294089,95	9,30 5,11 12,01	9,30 5,30 11,72	4343043,19	9647827,00	13410653,63

b3: Le rapport de masse (colonne 3), sur rigidité -colonnes 6 et 7) de deux niveaux successifs, ne doit pas varier de plus de 25% dans chaque direction de calcul (non applicable pour buanderie, salle d'ascenseur, etc.).

$$\left(\frac{M}{I_x}\right)_i - \left(\frac{M}{I_x}\right)_{i-1} < 25\% \text{ et } \left(\frac{M}{I_y}\right)_i - \left(\frac{M}{I_y}\right)_{i-1} < 25\%$$

b4: dans le cas de décrochement en élévation, la variation des dimensions, en plan du bâtiment entre deux niveaux successifs, ne dépasse pas 20% dans les deux directions de calcul et ne s'effectue que dans le sens d'une diminution avec la hauteur. La plus grande dimension latérale du bâtiment n'excède pas 1,5 fois sa plus petite dimension (non applicable pour buanderie, salle d'ascenseur, etc.).

- Conditions minimales sur le nombre d'étage. (**RPA2024 § 3.8.a**) La structure doit comporter au minimum 02 niveaux.
- Conditions minimales sur les travées. (**RPA2024 § 3.8.a**) La structure doit présenter, à chaque étage, au minimum 03 travées.
- Redondance en plan. (**RPA2024 § 3.8.b**) Chaque devra avoir, en plan, au moins 02 files de voiles dans la direction des forces latérales (Concernent uniquement les systèmes (4) et (5))

✓ Besoin d'un spectre de calcul (**RPA2024 § 3.3.3**) (équation 3.15) pour déterminer $\frac{S_{ad}}{g}(T_0)$ en fonction de T1, T2 et T3.

$$\frac{S_{ad}}{g}(T) = \begin{cases} A.I.S. \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_1} \cdot \left(2.5 \frac{0.4}{K} - \frac{2}{3} \right) \right] & \text{si } : 0 \leq T < T_1 \\ A.I.S. \left[2.5 \frac{0.4}{K} \right] & \text{si } : T_1 \leq T < T_2 \\ A.I.S. \left[2.5 \frac{0.4}{K} \right] \cdot \left[\frac{T_2}{T} \right] & \text{si } : T_2 \leq T < T_3 \\ A.I.S. \left[2.5 \frac{0.4}{K} \right] \cdot \left[\frac{T_2 T_3}{T^2} \right] & \text{si } : T_3 \leq T < 4s \end{cases}$$

✓ W : Poids total de la structure ($W_i = W_{Gi} + \psi W_{Qi}$) (RPA2024 Tableau 4.2).

De ROBOT, on tire les masses totales (colonnes 7 et 8) et on les multiplie par « $g=9.81$ » pour obtenir le poids total (dans les 02 directions X et Y).

Cas/Mode	Période [sec]	Masse Modale UX [%]	Masse Modale UY [%]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]	Tot.mas.UX [kg]	Tot.mas.UY [kg]
5/ 1	0,66	68,76	0,00	68,76	0,00	871681,46	871681,46
5/ 2	0,55	0,01	82,16	68,77	82,16	871681,46	871681,46
5/ 3	0,55	11,02	0,08	79,80	82,24	871681,46	871681,46
5/ 4	0,21	11,55	0,00	91,35	82,24	871681,46	871681,46
5/ 5	0,18	0,00	11,06	91,35	93,30	871681,46	871681,46
5/ 6	0,18	0,53	0,02	91,87	93,32	871681,46	871681,46
5/ 7	0,11	4,74	0,00	96,62	93,32	871681,46	871681,46
5/ 8	0,10	0,00	4,25	96,62	97,58	871681,46	871681,46
5/ 9	0,10	0,42	0,01	97,04	97,59	871681,46	871681,46
5/ 10	0,07	1,41	0,00	98,45	97,59	871681,46	871681,46

✓ Avec toutes ces données définies, calculer l'effort tranchant à la base par la MSE. Valeur à comparer avec l'effort tranchant à la base calculé par la méthode spectrale.

$$V = \lambda \cdot \frac{S_{ad}}{g} (T0) \cdot W$$

ii) Calcul de l'effort tranchant à la base par la méthode spectrale (ROBOT).

- ✓ A partir des données du problème, générer un spectre par n'importe quel logiciel disponible en format fichier .txt et l'introduire dans ROBOT.
- ✓ Définir d'abord, dans ROBOT, un nouveau type d'analyse, de type spectral (*Analyse/Types d'analyse/spectral*)
- ✓ Introduire le spectre ($S_a/g = f(T)$), en important le fichier .TXT, avec ses paramètres d'amortissement.
- ✓ Appliquer l'excitation (le spectre) suivant X puis suivant Y pour avoir les cas de chargements « Ex » et « Ey ». N'oublier de multiplier les composantes correspondantes (X ou Y) par « 9.81 » pour avoir « $S_a = f(T)$ ».
- ✓ Lancer les calculs.
- ✓ Récupérer les résultats pour déterminer les efforts V_x et V_y (*Résultats/Réactions*). On identifiera la somme des réactions suivant X (due uniquement à E_x colonne 2, ligne 5, ça donne V_x) et la somme des réactions suivant Y (due uniquement à E_y , ça donne V_y).

Noeud/Cas/Mode	FX [kN]	FY [kN]	FZ [kN]	MX [kNm]	MY [kNm]	MZ [kNm]
Vérification	-0,00	0,00	-0,00	0,00	0,00	0,00
Précision	2,58632e-04	5,28088e-11				
Mode CQC						
Somme totale	210,10	209,16	426,22	164,04	373,83	16,72
Somme réactions	204,19	0,91	0,00	2,34	1771,86	1581,74
Somme efforts	204,19	0,91	0,0	2,34	1771,86	1581,76
Vérification	408,38	1,82	0,00	4,68	3543,72	3163,50
Précision	1,60134e-03	4,85928e-09				

✓ La résultante des forces sismiques à la base, V_{tx} et V_{ty} , obtenues par combinaison des valeurs modales ne doit pas être inférieures à 80% de la résultante des forces sismiques V_{MSE} .

Si ($V_{tx} \leq 0,8V_{MSE}$), (ou V_{ty}) il faudra augmenter tous les paramètres de la réponse dans le rapport ($0,8V_{MSE}/V_{tx}$), ou V_{ty} . (RPA2024 § 4.3.5).

5. Introduction des combinaisons des charges selon (RPA2024 § 5.2.1) (équations 5.1 et 5.2) (Dans ROBOT).

✓ Introduire toutes les combinaisons réglementaires, une par une (Valable pour tous les éléments de la structure, sauf dans le cas de calcul des fondations, il faut utiliser d'autres combinaisons).

- $G + \psi Q$
- 04 Combinaisons E1 :
 - $G + \psi Q + E_x + 0,3 E_y$
 - $G + \psi Q + E_x - 0,3 E_y$
 - $G + \psi Q - E_x + 0,3 E_y$
 - $G + \psi Q - E_x - 0,3 E_y$
- 04 Combinaisons E2 :
 - $G + \psi Q + 0,3 E_x + E_y$
 - $G + \psi Q + 0,3 E_x - E_y$
 - $G + \psi Q - 0,3 E_x + E_y$
 - $G + \psi Q - 0,3 E_x - E_y$

✓ Lancer les calculs

6. Vérifier les différentes justifications imposées par les RPA2024. Certaines vérifications se feront juste après l'analyse numérique, d'autres doivent être vérifiées après le calcul du ferrailage.

i) Justifications avant le calcul du ferrailage (juste après analyse numérique).

✓ Justification du système à noyau ou à effet noyau

$$\begin{cases} r_x \leq l_x \\ \text{et} \\ r_y \leq l_y \end{cases}$$

✓ Justification Vis-à-vis de l'équilibre d'ensemble (Renversement) (RPA2024 § 5.5)

Il faut vérifier que $M_s \geq 1,3 M_r$. (Suivant les directions X et Y)

Avec : $M_s = \sum M_{si}$ et $M_r = \sum M_{ri}$ où $M_{ri} = V_i x h_i$ et $M_{si} = W_i x X_{gi}$ (i : Etage)

V_i (pour X et Y, V_x et V_y) sont déterminées à partir de la combinaison la plus défavorable, généralement $G + \psi Q + E_x + 0,3 E_y$.

h_i : Distance de l'étage considéré à partir de la base.

✓ Justification Vis-à-vis de la résistance du plancher (RPA2024 § 5.6)

Etape 1 : La capacité des planchers doit permettre de transmettre, aux éléments verticaux de contreventement, les effets des forces sismiques de calcul. (§ 5.6) et (§ 6.1.2).

On doit vérifier que (dans les 02 directions, et pour chaque étage) :

- Force sismique exercée sur le diaphragme (Robot) reste entre une valeur minimale ($0,35AIS W$) et une valeur maximale ($0,7 AIS W$).

$$0,35 (A.I.S)W_{pk} \leq F_{pk} \leq 0,70 (A.I.S)W_{pk}$$

Avec : $F_{pk} = \frac{F_l + \sum_{i=k}^n F_i}{\sum_{i=k}^n W_i} W_{pk}$ (F_{pk} Force sismique exercée sur le diaphragme au niveau « k »)

Etape 2 : Transmission des diaphragmes, avec une sur-résistance suffisante, les effets des actions sismiques, avec les combinaisons $G + \psi Q \pm 1,3 E_x$ et $G + \psi Q \pm 1,3 E_y$.

Ceci est valable pour :

- Formes irrégulières ou complexes en plan avec entailles ou excroissances
- Ouvertures grandes ou irrégulières dans le diaphragme
- Distribution irrégulière des masses et/ou des rigidités (comme par exemple dans le cas d'excroissances ou de retrait)
- Sous-sol avec murs périphériques partiels ou murs dans une partie seulement des RDC

- ✓ Justification Vis-à-vis de la largeur des joints (**RPA2024 § 5.8**) (Dans le cas de 02 blocs voisins). Les déplacements seront tirés des résultats de ROBOT pour la combinaison la plus défavorable, généralement $G + \psi Q + E_x + 0,3 E_y$

$$d_{min} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} \\ 40 \text{ mm} \end{array} \right.$$

- ✓ Justification Vis-à-vis de l'effet P-Δ (**RPA2024 § 5.9**)

$$\theta = \frac{P_k \Delta_k}{V_k h_k} \leq 0,1$$

Avec : $\Delta k = \delta_k - \delta_{k-1}$; $P_k = \sum_{i=k}^n W_{Gi} + \psi W_{Qi}$; $\delta_k = \frac{R}{Q_f} \delta_{ek}$ et

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

Si $0,10 \leq \theta_k \leq 0,20$ les effets P-Δ sont pris en compte de manière approximative en amplifiant les effets de l'action sismique calculés au moyen d'une analyse élastique du 1er ordre par le facteur $1/(1 - \theta_k)$

Si $\theta_k \geq 0,20$, la structure est instable et doit être redimensionnée

P_k : est tirée de la combinaison $G + \psi Q$ (Composante Fz)

Les déplacements inter-étages (dr Ux et dr Uy) sont tirés de ROBOT pour les combinaisons $G + \psi Q + E_x + 0,3 E_y$ et $G + \psi Q + 0,3 E_x + E_y$ respectivement.

- ✓ Justification Vis-à-vis des déplacements inter-étages (**RPA2024 § 5.10**)

$v_A \Delta_k \leq \overline{\Delta_k}$ (Limite) avec v_A coefficient réducteur dépendant du type de la structure (**RPA2024 Tableau 5.2**) et Δ_k : Déplacement relatif du niveau « k » par rapport au niveau « k-1 »

- ✓ Vérification des liaisons rigides (Notion de diaphragmes) (ça existait dans RPA99-Version 2003, mais elle a été supprimée dans RPA2024).

Il faut que la différence des 02 déplacements (Avec et sans liaisons rigides) ne dépasse pas 10%.

$$\Delta U_x = \frac{U_{x,sans} - U_{x,avec}}{U_{x,avec}} \leq 10\%$$

$$\Delta U_y = \frac{U_{y_sans} - U_{y_avec}}{U_{y_avec}} \leq 10\%$$

ii) Justifications après le calcul du ferrailage.

- ✓ Justification Vis-à-vis de la résistance (**RPA2024 § 5.3**)

$$S_d < R_d$$

- ✓ Justification Vis-à-vis de la ductilité (**RPA2024 § 5.4**)

Dispositions constructives

- ✓ Justification de la stabilité des fondations (**RPA2024 § 5.7**)

Exigences (Chap X) et aux combinaisons des charges (**RPA2024 Eqs 5.7 et 5.8**)

Etape 4 : Ferrailage

Objectif de l'étape : La détermination des sections des armatures des différents éléments (poutres, poteaux, dalles, voiles, fondations...) de la structure pour présenter les plans (coffrage et ferrailage) définitifs et complets pour l'exécution des travaux.

Après une analyse complète de notre structure (Statique, dynamique et spectrale), on peut tirer tous les efforts nécessaires pour le ferrailage de tous les éléments (Poteaux, poutres, chainages, dalle, fondations...) de notre structure.

1. Ferrailage des poteaux

i) Spécifications du coffrage (on vérifie le coffrage) (RPA2024 § 7.4.1)

✓ Dimensions de la section transversale des poteaux.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min}(b_1, h_1) \geq 25 \text{ cm} : \text{en zones I, II et III} \\ \text{Min}(b_1, h_1) \geq 30 \text{ cm} : \text{en zones IV, V et VI} \\ \text{Min}(b_1, h_1) \geq \frac{l_c}{20} : \text{quelle que soit la zone} \\ \frac{1}{4} < \frac{b_1}{h_1} < 4 : \text{quelle que soit la zone} \end{array} \right.$$

✓ Exigences de ductilité pour la zone critique

$l_{cr} = \text{Max} \left(1.5 h_c; \frac{l_{cL}}{6}; 60 \text{ cm} \right)$ avec $h_c(\text{cm}) = \text{Sup}(b_1, h_1)$ et l_{cL} : Hauteur libre du poteau

Si $\frac{l_{cL}}{h_c} < 3$: La hauteur totale du poteau doit être considérée comme zone critique

Pour les contreventements (1), (2) et (3) en zones IV, V et VI, il faut, pour les 02 premiers étages, les armatures de confinement doivent se prolonger au-delà des zones critiques d'une valeur ($l_{cr}/2$) (moitié).

Pour prendre en charge les effets locaux dus aux remplissages en maçonnerie ou en béton, il faut considérer la hauteur totale des poteaux de RDC comme longueur critique

ii) Spécifications du ferrailage (ferrailage minimal) (RPA2024 § 7.4.2)

✓ Armatures longitudinales, **HA, droites et sans crochets**

- % minimal : 0.8 % en Zone I, et II ; 0.9 % en zone III et 1.0 % en zones IV, V et VI

- % maximal : 4 % en zone courante et 8 % en zone de recouvrement
- Diamètre minimum : 12 mm
- Longueur minimale des recouvrements : 50 ϕ en zones I, II et III et 60 ϕ en zones IV, V et VI
- La distance entre les barres verticales dans une face du poteau ne doit pas dépasser : 20 cm en zones I, II et III et 15 cm en zones IV, V et VI
- Au moins 01 armature intermédiaire doit être prévue entre les armatures d'angle le long de chaque face du poteau
- Dans les zones critiques des poteaux : armatures de confinement et étriers au moins $\phi 6$
- La zone de recouvrement doit être en dehors des zones nodales

✓ Armatures transversales

$$\frac{A_t}{t} = \frac{\rho_a V_u}{h_1 f_e}$$

avec :

V_u : effort tranchant de calcul ; h_1 : hauteur totale de la section brute ; f_e : Contrainte limite de l'acier d'armature transversale ; ρ_a : coefficient correcteur tenant compte du mode fragile de la rupture par effort tranchant ($\rho_a=2,50$ si $\lambda g \geq 5$ et $\rho_a=3,75$ si $\lambda g < 5$) ; λg : élancement géométrique dans la direction, considérée et t : espacement des armatures transversales

- Valeur maximale de l'espacement : en zone nodale ($t \leq \text{Min}(10\phi; 12.5 \text{ cm})$) en Zones I, II et III et $t \leq \text{Min}(b_0/3, 10\text{cm}, 60\phi)$ en zones II IV, V et V).
- En zone courante ($t' \leq 15\phi$ en Zones I, II et III et $t' \leq \text{Min}(b_1/2; h_1/2; 10\phi)$ en zones IV, V et VI).
- Quantité d'armatures transversales minimales ($A_t/(t.b_1)$) en % : 0.3% pour $\lambda g \geq 5$; 0.80% pour $\lambda g \leq 3$ (entre les 02, interpoler) avec $\lambda g = \left(\frac{l_f}{a} \text{ ou } \frac{l_f}{b}\right)$ a, b : section droite du poteau; l_f : long flambement.

iii) Vérifications spécifiques pour les poteaux (RPA2024 § 7.4.3)

✓ Sollicitations normales.

- Pour éviter ou limiter le risque de rupture fragile. (RPA2024 eq. 7.5)

$$v = \frac{N_d}{B_c f_{c28}} \leq 0,35$$

Avec : V: effort normal réduit ; N_d : Effort normal de calcul sur une section de béton ; B_c : Aire (brute) de la section en béton et f_{c28} : résistance du béton à 28 j

- De ROBOT, tirer les efforts normal ($N = F_x$) et tranchants (F_y et F_z) des poteaux sous les combinaisons ELU et ELA (*Résultats/Efforts*).
- Vérifier la formule de l'effort normal réduit, en utilisant le cas le plus défavorable entre ELU et ELA (RPA2024 eq. 7.5)

✓ Sollicitations tangentielles.

- Vérifier (RPA2024 eq. 7.6)

$$\tau_{bu} \leq \bar{\tau}_{bu} = \rho_d f_{c28}$$

Avec : $\tau_{bu} = \frac{T}{b_0 d}$; $d = 0,9 h$ et $\rho_d = 0,075$ Si $\lambda g \geq 5$ ou bien $\rho_d = 0,04$ Si $\lambda g < 5$

Dans le cas de remplissage en maçonnerie pas sur toute la hauteur d'un poteau (présence d'ouverture de vasisas) (poteau court), la hauteur de calcul de l'élanement géométrique sera celle de l'ouverture.

iv) Ferrailage longitudinal des poteaux.

Le ferrailage longitudinal des poteaux se fera en flexion composée déviée, en utilisant les efforts normaux ($N=Fx$) et moments de flexion M_y et M_z . On s'intéresse plus particulièrement à N_{min} (Compression +), N_{max} (traction -), $M_{y_{max}}$ et $M_{z_{max}}$ et ceci pour le cas le plus défavorable entre ELU et ELA. (*Résultats/Efforts*).

✓ Détermination des efforts de ROBOT (pour ELU et ELA). 04 cas possibles :

- N_{min} (Compression +) : Repérer la barre, le nœud et la combinaison pour le cas de N_{min} (compression +) et tirer pour cette même barre, nœud et combinaison les valeurs de M_y et M_z correspondantes.
 - N_{max} (Traction -) : Repérer la barre, le nœud et la combinaison pour le cas de N_{max} (traction -) et tirer pour cette même barre, nœud et combinaison les valeurs de M_y et M_z correspondantes.
 - N_{max} (Traction -) : Repérer la barre, le nœud et la combinaison pour le cas de N_{max} (traction -) et tirer pour cette même barre, nœud et combinaison les valeurs de M_y et M_z correspondantes.
 - $M_{y_{max}}$: Repérer la barre, le nœud et la combinaison pour le cas de $M_{y_{max}}$ et tirer pour cette même barre, nœud et combinaison les valeurs de N et M_z correspondantes.
 - $M_{z_{max}}$: Repérer la barre, le nœud et la combinaison pour le cas de $M_{z_{max}}$ et tirer pour cette même barre, nœud et combinaison les valeurs de N et M_y correspondantes.
- ✓ Aller à EXPERT BA ou SOCOTEC (ou tout autre logiciel de calcul de ferrailage des sections en BA) et calculer le ferrailage (calcul à la flexion déviée composée) correspondant à ces valeurs pour une section carrée du poteau et ceci à l'ELU et l'ELA.
- ✓ **Rem** : On peut calculer le ferrailage des poteaux directement par ROBOT.
- ✓ Comparer les sections calculées avec les sections minimales des RPA024.
- ✓ Choisir une section (le nombre et le diamètre des barres), à appliquer dans les plans d'exécution.

v) Ferrailage transversal des poteaux.

- ✓ Le ferrailage transversal des poteaux se calcule, en utilisant les efforts sollicitations tangentes (efforts tranchants F_y max et F_z max) selon la combinaison la plus défavorable ELU et ELA.

$$\frac{A_t}{t} = \frac{\rho_a V_u = (F_{y_{max}} \text{ ou } F_{z_{max}})}{h_1 f_e}$$

- ✓ On impose généralement le diamètre et le nombre de brins (donc la section A_t), et on calcule l'espacement par la formule.
- ✓ Vérifier la section et l'espacement avec ceux des RPA2024.
- ✓ Choisir définitivement la section et les espacements (Zone nodale et zone courante) pour les plans d'exécution.

2. Ferrailage des poutres

i) Spécifications du coffrage (on vérifie le coffrage) (RPA2024 § 7.5.1)

- ✓ Dimensions de la section transversale des poutres.

$$\left\{ \begin{array}{l} b \geq 20 \text{ cm} : \text{en zones I, II et III} \\ b \geq 25 \text{ cm} : \text{en zones IV, V et VI} \\ h \geq 30 \text{ cm} \\ \frac{h}{b} \leq 4.0 \\ b_{\max} \leq (1.5h + b_1) \end{array} \right.$$

- ✓ Exigences de ductilité pour la zone critique

Les zones d'une poutre qui s'étendent sur une ($l_{cr} = 1.5h$) depuis la section transversale d'extrémité où la poutre est connectée à un nœud poteau-poutre, ainsi que de part et d'autre de toute autre section transversale susceptible de plastification dans la situation sismique de calcul, doivent être considérées comme des zones critiques, h étant la hauteur de la poutre.

Dans les poutres supportant des éléments verticaux discontinus (interrompus), il convient de considérer les zones s'étendant sur une distance ($2h$) de chaque côté de l'élément vertical supporté comme des zones critiques.

ii) Spécifications du ferrailage (ferrailage minimal) (RPA2024 § 7.5.2)

- ✓ Armatures longitudinales.

- % minimal : 0,5 % en toute section
- % maximal : 4 % en zone courante et 6 % en zone de recouvrement
- Longueur minimale des recouvrements : 50ϕ en zones I, II et III et 60ϕ en zones IV, V et VI
- L'ancrage des armatures longitudinales supérieures et inférieures dans les poteaux de rive et d'angle avec des crochets de 90° (voir figure)
- Les cadres du nœud en 2U superposés formant un carré ou rectangle.
- Les directions de recouvrement des U doivent être alternées.
- Au moins 02 barres longitudinal à HA, $\Phi=14\text{mm}$, dans les zones IV, V et VI à placer sur les faces sup et inf sur la longueur totale de la poutre
- $\frac{1}{4}$ de la section max d'armature supérieures sur appuis est prolongée sur toute la longueur de la poutre
- Poutres sollicitées principalement par les forces latérales, prévoir des armatures symétriques avec section en travée au moins égale à $\frac{1}{2}$ section en appui

- ✓ Armatures transversales

$$A_t = 0,003 s. b$$

- Valeur maximale de l'espacement : en zone nodale $s = \text{Min}(h/4; 24\Phi_t; 17.5 \text{ cm}; 6\Phi_l)$.
- En zone courante $s' \leq h/2$ avec $s' = \text{min}(h/4; 12\Phi_l)$.
- Diamètre Φ_l à prendre est le plus petit diamètre utilisé, et dans le cas d'une section en travée avec armatures comprimées, c'est le diamètre le plus petit des aciers comprimés.
- Les premières armatures transversales doivent être disposées à 5 cm au plus du nu de l'appui ou de l'encastrement

iii) Ferrailage longitudinal des poutres.

Le ferrailage longitudinal des poutres se fera en flexion simple, en utilisant les moments de flexion M_{max} (en appui et en travée), et ceci pour le cas le plus défavorable entre ELU et ELA. (*Résultats/Efforts*).

- ✓ Détermination des efforts de ROBOT (pour ELU, ELS (pour les vérifications) et ELA), en appui et en travée. (On peut regrouper les poutres qui se ressemblent en géométrie et en efforts internes afin d'être pratique).
- ✓ Aller à EXPERT BA ou SOCOTEC (ou tout autre logiciel de calcul de ferrailage des sections en BA) et calculer le ferrailage (calcul à la flexion simple) correspondant à ces valeurs (en appui et en travée) pour une section de la poutre et ceci à l'ELU et l'ELA.
- ✓ **Rem** : On peut calculer le ferrailage des poutres directement par ROBOT.
- ✓ Comparer les sections calculées avec les sections minimales des RPA024 et celle donnée par le BAEL, $A_{\text{min}} = 0,23 \frac{f_{t28}}{f_e} b. d$ avec $f_{t28} = 0,6 + 0,06f_{c28}$ et $d = 0,9 h$
- ✓ Choisir une section (le nombre et le diamètre des barres), à appliquer dans les plans d'exécution.

iv) Ferrailage transversal des poutres.

- ✓ Le ferrailage transversal des poutres se calcule, en utilisant les efforts sollicitations tangentes (efforts tranchants $F_z \text{ max}$) selon la combinaison la plus défavorable ELU et ELA.

$$\frac{A_t}{t} = \frac{\rho_a V_u = (F_{z\text{max}})}{h_1 f_e}$$

- ✓ On impose généralement le diamètre et le nombre de brins (donc la section A_t), et on calcule l'espacement par la formule.
- ✓ Vérifier que $A_{t\text{calc}} \geq A_t = 0,003 s. b$
- ✓ Puis vérifier la section et l'espacement avec ceux des RPA2024 et celle donnée par BAEL $\Phi_t \leq \text{min}(\Phi_l; \frac{h}{35}; \frac{b}{10})$ et $S_t \leq \frac{A_t f_e 0,9 d}{\gamma_s V_u}$ avec : A_t : Section totale des brins ; f_e : Limite d'élasticité de l'acier ; V_u : Effort tranchant maximal ; d : Hauteur utile de la poutre ($d=0,9h$ et γ_s : Coefficient de sécurité de l'acier (= 1,15))
- ✓ Choisir définitivement la section et les espacements (Zone nodale et zone courante) pour les plans d'exécution.

v) Vérification des contraintes.

- ✓ Tirer les moments de flexion M_y max de ROBOT à l'ELS (pour les vérifications), en appui et en travée.
- ✓ Aller à EXPERT BA ou SOCOTEC (ou tout autre logiciel de calcul de ferrailage des sections en BA) et calculer les contraintes maximales du béton et de l'acier en combinaison ELS, avec les valeurs des armatures choisies.
- ✓ Comparer les contraintes calculées (acier et béton) aux contraintes admissibles, $\bar{\sigma}_{bc} = 0,6 f_{cj}$ et $\bar{\sigma}_{st} = f_e = 400 \text{ MPa}$ (Peu préjudiciable) ; $\bar{\sigma}_{st} = \text{Min} \left\{ \frac{2f_e}{3}; \text{Max} \{0,5f_e; 110\sqrt{\eta f_{tj}}\} \right\}$ (Préjudiciable) et $\bar{\sigma}_{st} = 0,8 \text{Min} \left\{ \frac{2f_e}{3}; \text{Max} \{0,5f_e; 110\sqrt{\eta f_{tj}}\} \right\}$ (Très préjudiciable) avec $\eta = 1,6$ (HA > 6 mm) ; $\eta = 1,3$ (HA < 6 mm) et $\eta = 1,0$ (RL)

vi) Vérification de la flèche.

- ✓ Tirer les moments de flexion M_y max de ROBOT pour les cas de chargements « G » et « Q » (pour la vérification de la flèche), en appui et en travée.
- ✓ Aller à EXPERT BA ou SOCOTEC (ou tout autre logiciel de calcul de ferrailage des sections en BA) et calculer la flèche, (avec M_y G et M_y Q) avec les valeurs des armatures choisies.
- ✓ Comparer la flèche calculée à la flèche admissible, $f_{adm} = \frac{l}{500}$ (si $l \leq 5,0$ m) ou $f_{adm} = 0,005 + \frac{l}{1000}$ (si $l > 5,0$ m).

3. Ferrailage des poutrelles (Dalle en corps creux).

On choisira les poutrelles selon les longueurs et les charges. On peut les regrouper pour question pratique (exemple un type de poutrelle par étage).

i) Spécifications du coffrage (on vérifie le coffrage) (RPA2024 § 7.5.1)

- ✓ Dimensions de la section transversale des poutrelles. On choisira une section en « Te », avec $\frac{l}{20} \leq h \leq \frac{l}{25} \approx h = \frac{l}{22,5}$ et $0,4 h_t \leq b_0 \leq 0,8 h_t$. Par contre la largeur de la table est prise égale à 60 cm (Hourdis). Le calcul se fera de la même manière que celui d'une poutre rectangulaire.

ii) Modéliser la poutrelle dans ROBOT.

- Définir la section puis la dessiner dans n'importe quelle étage (en vue en plan), et dans n'importe quelle ligne (l'essentiel qu'il y ait des intersections avec les poutres principales pour reproduire les appuis de la poutrelle).
- Appliquer les charges G et Q (celles du plancher déjà définies) mais en les transformant par mètre linéaire (on multiplie G(KN/m²) et Q(KN/m²) par la largeur 60 cm). On aura G_poutrelle et Q_poutrelle.

iii) Ferrailage de la poutrelle. Suit exactement la démarche de ferrailage de la poutre principale, avec ses vérifications (EXPERT, SOCOTEC...)

4. Ferrailage de la dalle pleine (Balcons, volées, paliers...).

Le ferrailage des dalles pleines se fera en flexion simple selon les 02 directions avec des armatures supérieures (calculées par les moments positifs) et les armatures inférieures (calculées par les moments négatifs).

On travaille par mètre linéaire, donc on choisira une section de largeur 1.0 m par l'épaisseur.

i) Ferrailage des dalles pleines

- ✓ Tirer les efforts de ROBOT (pour ELU, ELS (pour les vérifications) et ELA), les moments de flexion M_x et M_y (en positif et négatif). Attention au repère local des dalles, qui définissent les flexions. Les moments sont définis par ml (KN.m/ml) et la convention de signe est inversée par rapport à celle des poutres (généralement le long des axes).
- ✓ Aller à EXPERT BA ou SOCOTEC (ou tout autre logiciel de calcul de ferrailage des sections en BA) et calculer le ferrailage (calcul à la flexion simple) correspondant à ces valeurs (M^- pour armature inférieure et M^+ pour armature supérieure) et ceci dans les 02 sens X et Y).
- ✓ Comparer les sections calculées avec les sections minimales des RPA024 et celle donnée par le BAEL, $A_{min} = 0,23 \frac{f_{t28}}{f_e} b \cdot d$ avec $f_{t28} = 0,6 + 0,06f_{c28}$ et $d = 0,9 h$
- ✓ Choisir une section (le nombre et le diamètre des barres) dans les 02 sens, à appliquer dans les plans d'exécution.

ii) Vérification selon BAEL.

- ✓ Justification des armatures d'effort tranchant. Est ce qu'il faut ajouter des cadres ou non ?
 - Pas d'armatures d'effort tranchant SSI Bétonnage sans reprise sur toute l'épaisseur de la dalle
- ✓ Justification du béton et de l'acier avec armatures d'effort tranchant.
- ✓ De ROBOT, on tire les valeurs maximales des efforts tranchants T_x et T_y (*Résultats/cartographie panneaux*)
- ✓ Avec la valeur maximale de T_x ou T_y , vérifier

$$\tau_{bu} = \frac{Vu}{b_0 d} \leq \bar{\tau}_{bu} = 0,07 \frac{f_{cj}}{\gamma_b}$$

- Dans le cas où $\tau_{bu} > \bar{\tau}_{bu}$, il faut soit augmenter la section du béton, soit ajouter des armatures transversales ou armatures d'effort tranchant.

Dans ce dernier cas, il faut faire 2 vérifications :

Vérifier le béton à l'ELU (A.5.1.211)

$$\tau_{bu} \leq \tau_{limite} = \min\left(0,2 \frac{f_{cj}}{\gamma_b}; 5MPa\right) \text{ (Préjudiciable)}$$

$$\tau_{bu} \leq \tau_{limite} = \min\left(0,2 \frac{f_{cj}}{\gamma_b}; 5MPa\right) \text{ (Très Préjudiciable)}$$

Avec τ_{limite} à multiplier par

- ✓ $10h/3$ si $0,15 \leq h \leq 0,3$
- ✓ 1 si $h \geq 0,3$

Vérification de l'acier à l'ELU (A.5.1.23)

$$\frac{A_t}{b_0 \cdot S_t} \geq \frac{\gamma_s(\tau u - 0,3 \cdot f_{tj} K)}{0,9 f_e (\cos \alpha + \sin \alpha)} = \frac{\gamma_s(\tau u - 0,3 \cdot f_{tj})}{0,9 f_e} \quad (\text{pour } \alpha = 90^\circ, \text{ armature droite}) \quad (\text{avec } f_{tj} \text{ limite} = 3,3 \text{ Mpa})$$

5. Ferrailage des semelles isolées (RPA2024 § 10.1)

Le ferrailage des semelles isolées se fera selon l'ancrage de la semelle et surtout selon la position des longrines. Si les longrines sont posées directement sur les semelles, ces dernières seront calculées à la flexion composée avec N, My et Mz.

Par contre, si les longrines sont posées à une certaine hauteur (disons $h \geq 1.2$ m), les semelles seront calculées uniquement à la compression simple avec N.

Aussi, les combinaisons de charges pour le calcul des fondations seront différentes des combinaisons de charges des autres éléments de la structure.

i) Longrines. (RPA2024 § 10.1.1)

- ✓ Les longrines doivent former un réseau sur les 02 directions.
- ✓ Les dimensions minimales seront de 25 x 30 cm sur sites S2 et S3 et de 30 x 30 cm sur site S4.
- ✓ Les armatures de la longrine seront calculées de façon à ce qu'elle résiste à un effort de traction de $F = \pm \alpha (A. I. S). N \geq 20 \text{ KN}$ où « N » est la valeur moyenne des charges verticales en situation sismique et « α » coefficient fonction du site. (RPA2024 éq. 10.2)
- ✓ Le ferrailage minimal de la longrine est égal à 06% de la section avec des espacements des cadres $< \min(20 \text{ cm}, 15\Phi)$.
- ✓ Solidarisation des longrines est obligatoire sauf dans le cas de sol rocheux sain, non fracturé (S1) et aussi site S2 en zone I.
- ✓ Pour les structures légères (type hangar), les longrines peuvent être remplacées par un dallage
- ✓ Pour les structures lourdes (bâtiments élevés) avec plusieurs blocs, séparés par des joints, il est recommandé de supprimer les joints de fondations si le système de fondation et la qualité du sol sont les mêmes partout.
- ✓ A moins de 1,20 m, les poutres du plancher inférieure peuvent être considérées comme des longrines.

ii) Voile périphérique (RPA2024 § 10.1.2)

- ✓ Ossatures à poteaux courts (vides sanitaires) doivent comporter un voile périphérique continu entre le niveau des fondations et le niveau de base.
- ✓ Le voile périphérique est facultatif en zones I, II et III pour les constructions individuelles ou hauteur ≤ 10 m.
- ✓ En cas de joint de rupture, le voile doit ceinturer chaque bloc.
- ✓ L'épaisseur du voile doit être ≥ 15 cm
- ✓ 02 nappes d'armature : % min 0,10 % dans les 02 sens (hor. et vert).
- ✓ Les ouvertures doivent avoir un effet négligeable sur la rigidité du voile.

iii) Vérification de la capacité portante (RPA2024 § 10.1.4)

- ✓ Les combinaisons d'action retenues dans le calcul des fondations seront : (à introduire une par une dans ROBOT) (RPA2024 § 5.7)

Pour les fondations d'éléments verticaux individuels (poteaux, voiles...) :

$$G + \psi Q \pm \frac{R}{Q_F} E_x$$

$$G + \psi Q \pm \frac{R}{Q_F} E_y$$

Pour les fondations communes à plusieurs éléments verticaux (longrines, semelle filante, radier...) :

$$G + \psi Q \pm 1,4 E_x$$

$$G + \psi Q \pm 1,4 E_y$$

- ✓ Dans les calculs de capacité, pour les fondations superficielles, il faut tenir compte de l'application à la résistance limite du sol « Q_l » d'un coefficient de sécurité de 2,0. (**DTR BC 2.33**)
 - ✓ Pour les fondations profondes, tenir compte de l'application des coefficients de sécurité globaux « γ_R » (**DTR BC 2.33**) sur la charge limite Q_l dépendant du mode de fonctionnement du pieu et de la méthode de détermination de Q_l . (**RPA2024 tableau 10.1**) avec : $Q_l = Q_{pl} + Q'_{sl}$ où Q_{pl} : Résistance limite en pointe et Q'_{sl} : Résistance limite en frottement latéral.
- iv) Résistance au glissement se référer au document **DTR 2.33** avec l'application d'un coefficient de sécurité égal à 1.25

Rem : La vérification au renversement est faite avant pour le cas de la stabilité d'ensemble du bâtiment ou de l'ouvrage.

v) Ferrailage de la semelle.

- ✓ Nous considérons le cas de la longrine posée en haut de la semelle (pas directement sur la semelle), donc on sera dans le cas de la compression simple. L'autre cas, est traité de la même manière, sauf qu'il faut calculer en flexion composée.
- ✓ Introduire les différentes combinaisons dans ROBOT, correspondant aux semelles sous élément individuel.
- ✓ Lancer le calcul
- ✓ De ROBOT, tirer les valeurs (réactions) de N_{max} « Fz » (du poteau le plus sollicité) (**Edition/Sélection spéciale/Barres seules**) selon les combinaisons ELU, ELS et ELA (normalement les valeurs des moments correspondants M_y et M_z sont nulles ou négligeables). (**Résultats/Efforts/Réactions**).
- ✓ Calculer le ferrailage avec l'effort N_{max} le plus défavorable (ELU, ELA) selon BAEL (voir des logiciels disponibles) ou bien par ROBOT directement.
- ✓ Vérification des contraintes de sol suivant X et Y (trapézoïdale ou triangulaire)
- ✓ Vérification au non poinçonnement.

Etape Finale : Documentation du projet

Objectif de l'étape : consiste à documenter tous les détails du projet en présentant une note de calcul, un plan de coffrage et un plan de ferrailage pour l'exécution des travaux.

Etape Finale : Documentation du projet

- ✓ Le projet nécessite une documentation à finaliser et à présenter aux concernés (maitre d'œuvre, maitre d'ouvrage...).
- ✓ L'objectif de la documentation : Pour justifier la sécurité réglementaire, permettre l'exécution correcte sur chantier et assurer la traçabilité technique du projet.
- ✓ La documentation finale du projet est appelée généralement le plan d'exécution et comporte :
 - Une note de calcul, pour justifier les choix structuraux, prouver la conformité aux réglementations (BAEL, RPA, CBA...) et servir de référence en cas de contrôle ou litige.
 - Des plans de coffrage, pour définir la forme et les dimensions des éléments en béton (Géométrie de la structure) et servir de base aux plans de ferrailage.
 - Des plans de ferrailage, dits aussi document d'exécution, où on définit le type, diamètre, nombre et position des armatures (transversales et longitudinales) des différents éléments de la structure et garantir la conformité au calcul et aux RPA.
 - Les quantitatifs des aciers, qui est optionnel mais recommandé) où on présente des tableaux des aciers par élément, le poids total des aciers par diamètre (pour l'approvisionnement) et aide au chiffrage et au suivi sur chantier.