

Chapitre 3 : Sollicitations et sections de calcul

3.1. Introduction :

Une structure et ses composants doivent satisfaire simultanément un certain nombre d'états limites ou d'exigences de conception. Elle doit posséder une résistance adéquate, être stable et fonctionner de manière satisfaisante sous les charges de service. De plus, elle doit être durable, bénéficier d'une protection contre le feu suffisante, résister aux charges de fatigue et répondre à toute exigence spéciale liée à son utilisation prévue. Les codes de pratique spécifient des critères de conception qui offrent une marge de sécurité appropriée contre le risque qu'une structure devienne inapte au service de l'une de ces manières. Si une structure devient inapte au service de quelque manière que ce soit, on dit qu'elle a atteint un état limite. Les états limites sont les conséquences indésirables associées à chaque mode de défaillance possible. Afin de satisfaire aux critères de conception établis dans les codes de pratique, des méthodes de conception et d'analyse appropriées à l'état limite considéré doivent être utilisées. Par exemple, si la résistance d'une section transversale doit être calculée, des procédures d'analyse et de conception basées sur la résistance ultime sont généralement adoptées. Les méthodes d'analyse et de conception basées sur la charge de rupture (méthodes plastiques) peuvent être adaptées pour calculer la résistance des structures ductiles et hyperstatiques. Si les états limites de service, tels que les déformations excessives (ou contre-flèches) ou la fissuration excessive, sont pris en compte, une analyse tenant compte de la nature non linéaire et inélastique du béton est généralement nécessaire. Les sources de cette non-linéarité du matériau béton incluent la fissuration, le raidissement en traction, le fluage et le retrait. De plus, le fluage de l'acier de précontrainte à haute résistance (plus couramment appelé relaxation) peut affecter le comportement en service. Chaque état limite doit être considéré et conçu séparément. La satisfaction d'un état limite ne garantit pas la satisfaction des autres. Toutes les conséquences indésirables doivent être évitées. Pour chaque état limite, le concepteur doit comparer la capacité de la structure avec les charges externes appropriées. Dans les sections suivantes, les exigences de conception pour le béton précontraint sont discutées, y compris les charges spécifiées et les combinaisons de charges, ainsi que les traitements de la sécurité structurale contenus dans plusieurs codes de pratique majeurs.

3.2. Les états limites:

3.2.1. Etat limite ultime (ELU):

L'**état limite ultime (ELU)** correspond à la situation dans laquelle une structure ou un élément structurel atteint sa capacité maximale de résistance ou de stabilité, au-delà de laquelle il risque de subir une rupture, un effondrement ou une défaillance catastrophique. Cet état marque la limite de la sécurité structurale, où les matériaux (comme le béton ou l'acier) atteignent leur résistance ultime ou où la structure perd son équilibre statique. Le dépassement de l'état limite ultime compromet gravement la

sécurité des personnes et des biens, car il peut entraîner la ruine partielle ou totale de la structure.

Les principaux types d'états limites ultimes incluent :

- A. **État limite de résistance** : atteinte de la capacité portante maximale des matériaux ou des sections de la structure.
- B. **État limite de stabilité** : perte d'équilibre statique, comme le basculement ou le glissement.
- C. **État limite de flambement** : instabilité due à la déformation excessive sous charge critique.

La conception des structures vise à éviter l'atteinte de l'état limite ultime en appliquant des coefficients de sécurité et en respectant les normes de construction en vigueur.

3. 2.2. Etat limite de service :

L'**état limite de service (ELS)** correspond à des conditions dans lesquelles une structure ou un élément structurel reste fonctionnel et sûr en usage normal, mais où certaines limitations sont atteintes en termes de performance, de confort ou de durabilité. Contrairement à l'état limite ultime (ELU), qui concerne la rupture ou l'effondrement, l'état limite de service se concentre sur les aspects liés à l'utilisation quotidienne de la structure, sans compromettre sa sécurité globale.

Les principaux critères de l'état limite de service incluent :

- A. **Limitation des déformations** : contrôle des flèches (déformations) pour éviter des dommages aux éléments non structuraux (cloisons, revêtements) ou des problèmes esthétiques.
- B. **Limitation des fissures** : maîtrise de l'ouverture des fissures dans les matériaux comme le béton armé pour préserver la durabilité et l'étanchéité de la structure.
- C. **Vibrations excessives** : prévention des vibrations qui pourraient affecter le confort des occupants ou le fonctionnement d'équipements sensibles.
- D. **Durabilité** : garantie que la structure résiste aux agressions environnementales (corrosion, gel, etc.) sur une longue période.

L'objectif de l'état limite de service est de s'assurer que la structure reste fonctionnelle, confortable et durable tout au long de sa vie utile, sans atteindre des niveaux de déformation ou de détérioration qui pourraient nuire à son usage ou à son apparence.

3.3. Actions :

Les **actions** (ou sollicitations) désignent toutes les forces, charges ou influences extérieures qui agissent sur une structure ou un élément structurel, provoquant des contraintes, des déformations ou des déplacements. Ces actions peuvent être permanentes, variables ou accidentelles, et elles sont prises en compte lors de la conception et de l'analyse des structures pour garantir leur sécurité, leur stabilité et leur durabilité.

On distingue généralement trois catégories principales d'actions :

A. Actions permanentes (G) :

Ce sont des charges qui s'exercent de manière constante tout au long de la vie de la structure. Elles incluent :

- Le poids propre des matériaux (béton, acier, etc.).
- Les charges fixes (cloisons, équipements permanents, etc.).

B. Actions variables (Q) :

Ces charges varient en intensité ou en position au cours du temps. Elles comprennent :

- Les charges d'exploitation (personnes, mobilier, véhicules).
- Les charges climatiques (neige, vent, température).
- Les charges dynamiques (trafic, vibrations).

C. Actions accidentelles (A) :

Ces actions sont rares, mais extrêmement intenses. Elles incluent :

- Les séismes.
- Les explosions.
- Les chocs (impact de véhicules, chute d'objets).

Les actions sont classées en fonction de leur nature et de leur durée d'application, et elles sont combinées selon des règles spécifiques (combinaisons d'actions) définies par les normes et codes de construction (par exemple, l'Eurocode). Ces combinaisons permettent de vérifier que la structure reste sûre et fonctionnelle dans toutes les situations possibles, y compris les plus défavorables.

3.4. Sollicitations

Les **sollicitations** désignent les effets internes induits dans une structure ou un élément structural par les **actions** (charges ou forces) extérieures qui lui sont appliquées. Ces effets se manifestent sous forme de contraintes, de déformations, de moments, d'efforts tranchants, de torsions ou d'efforts normaux (traction ou compression). Les sollicitations sont essentielles pour analyser et dimensionner une structure, car elles permettent de vérifier sa résistance, sa stabilité et sa capacité à supporter les charges sans défaillance.

3.4.1. Types de sollicitations :**A. Effort normal (N) :**

- **Traction** : force qui tend à allonger l'élément.
- **Compression** : force qui tend à écraser ou à raccourcir l'élément.

B. Effort tranchant (V) :

Force qui tend à provoquer un glissement ou une coupure dans une section transversale de l'élément.

C. Moment fléchissant (M) :

Force qui provoque une flexion ou une courbure de l'élément, créant des zones de compression et de traction.

D. Moment de torsion (T) :

Force qui tend à faire tourner ou tordre l'élément autour de son axe longitudinal.

E. Contraintes et déformations :

- Les **contraintes** (σ pour les contraintes normales, τ pour les contraintes de cisaillement) représentent la distribution interne des forces par unité de surface.
- Les **déformations** (ε pour les déformations normales, γ pour les déformations de cisaillement) mesurent l'allongement, le raccourcissement ou la distorsion de l'élément sous l'effet des sollicitations.

3.4.2. Importance des sollicitations :

Les sollicitations sont calculées pour chaque élément structural (poutre, poteau, dalle, etc.) afin de s'assurer que les matériaux utilisés (béton, acier, bois, etc.) peuvent résister aux forces appliquées sans dépasser leurs limites de résistance. Elles sont également utilisées pour vérifier les **états limites** (état limite ultime et état limite de service) et garantir la sécurité et la durabilité de la structure.

En résumé, les sollicitations sont les réponses internes d'une structure aux actions extérieures, et leur analyse est fondamentale pour une conception structurale sûre et efficace.

3.4.3. Sollicitations de calcul à l'ELU :**A. Combinaisons fondamentales :**

En règle générale, les sollicitations de calcul à considérer sont les suivantes :

$$\gamma_p + P_m + 1,35.G_{\max} + G_{\min} + \gamma_{Q1}Q_{1k} + \Sigma 1,3\psi_{0i}Q_{ik}. \quad (\text{Eq.3.1})$$

Avec :

$\gamma_p = 1$ dans la plupart des cas.

P_m : valeur probable de l'action de précontrainte.

$G_{\max}$: ensemble des actions permanentes défavorables.

$G_{\min}$: ensemble des actions permanentes favorables.

$\gamma_{Q1} = 1,5$ dans le cas général.

Q_{1k} : la valeur caractéristique de l'action de base.

$\psi_{0i}Q_{ik}$: la valeur de combinaison d'une action d'accompagnement.

B. Combinaisons accidentelles :

$$P_m + F_A + G_{\max} + G_{\min} + \psi_{11}Q_{1k} + \Sigma\psi_{2i}Q_{ik}. \quad (\text{Eq.3.2})$$

Avec :

F_A : la valeur nominale de l'action accidentelle.

$\psi_{11}Q_{1k}$: la valeur fréquente d'une action variable.

$\psi_{2i}Q_{ik}$: la valeur quasi-permanente d'une autre action variable.

3.4.4. Sollicitations de calcul à l'E.L.S**A. Combinaisons rares :**

$$P_d + G_{\max} + G_{\min} + Q_{1k} + \Sigma\psi_{0i}Q_{ik}. \quad (\text{Eq.3.3})$$

Avec, P_d : la valeur la plus défavorable de l'action de précontrainte entre P_1 et P_2 .

B. Combinaisons fréquentes :

$$P_d + G_{\max} + G_{\min} + \psi_{11}Q_{1k} + \Sigma\psi_{2i}Q_{ik}. \quad (\text{Eq.3.4})$$

C. Combinaisons quasi-permanentes :

$$P_d + G_{\max} + G_{\min} + \Sigma\psi_{2i}Q_{ik}. \quad (\text{Eq.3.5})$$

NB : Les valeurs des coefficients ψ_0 , ψ_1 et ψ_2 varient selon la nature de la structure et sont données par les règles BAEL 91.

3. 5. Section de calcul:

Les sections de calcul permettent de s'assurer que chaque élément structurel est correctement dimensionné pour résister aux sollicitations auxquelles il est soumis, tout en respectant les normes de sécurité et de performance. Elles constituent une étape clé dans la conception des structures.

Les caractéristiques géométriques des sections sont des paramètres qui décrivent la forme et les dimensions d'une section transversale d'un élément structurel (poutre, poteau, dalle, etc.). Ces caractéristiques sont essentielles pour calculer les propriétés mécaniques de la section, telles que sa résistance, sa rigidité et sa capacité à résister aux sollicitations (flexion, cisaillement, torsion, etc.). Voici les principales caractéristiques géométriques :

3.5. 1. Aire de la section (A)

- **Définition** : Surface totale de la section transversale.
- **Unité** : m^2 , cm^2 , mm^2 .
- **Utilité** : Utilisée pour calculer les contraintes normales (compression/traction) et la capacité portante.

Exemple :

- Pour une section rectangulaire :

$$A = b \cdot h \quad (\text{Eq.3.6})$$

où b = largeur et h = hauteur.

3.5. 2. Moment statique (S)

- **Définition** : Mesure de la répartition de l'aire par rapport à un axe de référence.
- **Unité** : m^3 , cm^3 , mm^3 .
- **Utilité** : Utilisé pour déterminer le centre de gravité (ou centre géométrique) de la section.
- **Exemple** : Pour une section rectangulaire :
$$S_x = A \cdot y \quad (Eq.3.7)$$

où y = distance du centre de gravité à l'axe de référence.

3.5.3. Centre de gravité (G)

- **Définition** : Point où la section est en équilibre parfait sous l'effet de son propre poids.
- **Utilité** : Essentiel pour déterminer les axes neutres et calculer les moments d'inertie.
- **Calcul** : Pour une section composée, le centre de gravité est calculé en fonction des aires et des positions des sous-sections.

3.5.4. Moment d'inertie (I)

- **Définition** : Mesure de la résistance de la section à la flexion par rapport à un axe donné.
- **Unité** : m^4 , cm^4 , mm^4 .
- **Utilité** : Utilisé pour calculer les déformations et les contraintes dues à la flexion.
- **Formules courantes** :
 - Section rectangulaire:

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad (Eq.3.8)$$

- Section circulaire:

$$I_x = \frac{\pi d^4}{64} \quad (Eq.3.9)$$

ou d = diamètre

Remarque:

- I_x : Moment d'inertie par rapport à l'axe horizontal (x).
- I_y : Moment d'inertie par rapport à l'axe vertical (y).

3.5.5. Modules de résistance W_x et W_y (cm^3) :

Le module de résistance est égal au quotient du moment d'inertie axial par la distance de l'axe à la fibre la plus éloignée.

$$W_x = \frac{I_x}{y}, \quad W_y = \frac{I_y}{x} \quad (\text{Eq.3.10})$$

3.5.6. Module de flexion (W)

- **Définition** : Rapport entre le moment d'inertie et la distance maximale à l'axe neutre.
- **Unité** : m³, cm³, mm³.
- **Utilité** : Utilisé pour calculer les contraintes maximales dues à la flexion.
- **Formule** :

$$W = \frac{I}{v} \quad (\text{Eq.3.11})$$

Ou v = la distance entre l'axe neutre et la fibre la plus éloignée.

Exemple : pour une section rectangulaire : $W_x = \frac{bh^2}{6}$

3.5.7. Rayon de giration (i)

- **Définition** : Mesure de la répartition de l'aire autour d'un axe.
- **Unité** : m, cm, mm.
- **Utilité** : Utilisé pour évaluer la résistance au flambement.
- **Formule** :

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (\text{Eq.3.12})$$

3.5.8. Moment d'inertie polaire (J)

- **Définition** : Mesure de la résistance à la torsion.
- **Unité** : m⁴, cm⁴, mm⁴.
- **Utilité** : Utilisé pour calculer les contraintes de torsion.
- **Formule** : Pour une section circulaire

$$J = \frac{\pi d^4}{32} \quad (\text{Eq.3.13})$$

3.5.9. Rendement d'une section :

Le rendement d'une section est donné par:

$$\rho = \frac{I}{BV_i V_s} \quad (\text{Eq.3.14})$$

Il caractérise l'aspect économique d'une section vis-à-vis du comportement à la flexion.

3.5.10. Types de section :

Les notions de **section brute** et de **section nette** sont essentielles en génie civil pour le dimensionnement et l'analyse des éléments structuraux. Elles permettent de décrire la surface effective d'une section transversale en tenant compte ou non des réductions de matière (trous, perforations, etc.).

A. Section brute

La **section brute** représente la surface totale de la section transversale d'un élément structurel **sans tenir compte des éventuelles ouvertures, perforations ou réductions de matière**. Elle inclut l'intégralité de la surface de la section, qu'elle soit en béton, en acier, en bois ou en tout autre matériau.

Pour une section rectangulaire : $A_{brute} = b \cdot h$, où b = largeur et h = hauteur.

B. Section nette

La **section nette** représente la surface effective de la section transversale **après déduction des ouvertures, perforations ou réductions de matière**. Elle tient compte des vides qui réduisent la capacité portante de l'élément.

$A_{nette} = A_{brute} - \text{surface des trous}$.

C. Section homogène :

C'est la section obtenue en ajoutant à section nette la section des armatures longitudinales adhérente multipliée par un coefficient d'équivalence convenable « n », sous réserve de l'adhérence entre ces armatures avec le béton (ce qui est le cas en pré-tension, et en post tension après injection de coulis adéquat). La section homogène sert à calculer les contraintes dues aux charges appliquées après l'injection des conduits, ce qui correspond en général aux charges variables.

$A_h = A_n + (\text{section d'armatures longitudinales adhérentes}) \times (\text{Coefficient d'équivalence } n)$.

$n = 5$: cas des actions de courte durée.

$n = 15$: cas des actions de longue durée.

D. Section homogène réduite (section fissurée):

Elle est obtenue en négligeant la partie de béton tendu. La section homogène réduite se calcule à partir de la seule section de béton comprimé, des aciers passifs avec un coefficient d'équivalence égal à 15 et des aciers actifs de précontrainte avec un coefficient d'équivalence égal à :

- 15 dans le cas de pré-tension.
- 0 pour les armatures non adhérentes en post tension.
- 15/2 pour les armatures adhérentes en post tension.

$A_{hr} = (\text{Section du béton comprimé seul}) + (\text{section d'armatures passives}) \times (n) + (\text{section d'armatures de précontrainte}) \times (n')$.

La section homogène réduite est utilisée pour le calcul des contraintes en classe III.