

PRINCIPES DE CALCUL

Tout ouvrage doit être conçu à la fois pour résister aux actions auxquelles il risque d'être soumis et pour procurer des conditions d'utilisation adéquates.

On parle d'états limites ultimes (résistance) et d'états limites de service (utilisation), ou encore d'ELU et d'ELS. Aux ELU vont correspondre des hypothèses d'agression majorée (rare) pour lesquelles on devra justifier la résistance de l'ouvrage ; aux ELS correspondront des conditions d'agression moins sévères, pour lesquelles on devra surtout justifier l'absence de déformations et de déplacements excessifs.

Normes

Il est généralement convenu entre les parties de concevoir un ouvrage selon les normes en vigueur. En ce qui concerne les ouvrages métalliques, il s'agit depuis 1966 du DTU CM 66, complété en 1980 par un additif, et des diverses normes de la série NF P 22.

Depuis les années 1990, des normes européennes (Eurocodes EN 199x.y) remplacent progressivement les normes françaises. Cette évolution présente deux paliers majeurs :

- en 2008, la publication de tous les Eurocodes ainsi que leurs annexes nationales par l'Association française de normalisation (Afnor) en tant que normes françaises ;
- le remplacement définitif par les Eurocodes des normes françaises antérieures est prévu en 2010.

Signalons également la nouvelle norme européenne EN 1090 qui traite de l'exécution des ouvrages de construction métallique (fabrication, montage).

Bases de calcul

EXIGENCES FONDAMENTALES

Les bases de calcul sont définies dans l'Eurocode EN 1990 (dit « EC 0 »)

Il y est ainsi établi qu'une structure doit être conçue, calculée et réalisée afin :

- qu'avec une probabilité acceptable, elle reste apte à l'utilisation pour laquelle elle a été prévue, compte tenu de sa durée de vie envisagée ;
- qu'avec des degrés appropriés de fiabilité elle puisse résister à toutes les actions et autres influences susceptibles de s'exercer aussi bien pendant l'exécution (c'est-à-dire la période de construction) que durant son exploitation (c'est-à-dire la période de service).

PRINCIPES DE CALCUL AUX ÉTATS LIMITES

Tous les Eurocodes, dont l'Eurocode 3 (Acier), utilisent la notion d'état limite pour caractériser les états au-delà desquels la structure ne satisfait plus aux performances exigées. Il y en a deux catégories :

- Les états limites ultimes (ELU) correspondant à la sécurité structurale. Ils sont associés à l'effondrement de la structure ou à d'autres formes de ruine structurale qui peuvent mettre en danger la sécurité des personnes ;
- Les états limites de service (ELS) correspondant à l'aptitude de service. Ce sont les états au-delà desquels les critères spécifiés d'exploitation ne sont plus satisfaits :
 - déformations ou flèches affectant l'aspect ou l'exploitation efficace de la construction,
 - vibrations incommodes des occupants, endommageant le bâtiment ou limitant son efficacité fonctionnelle.

MÉTHODE DES COEFFICIENTS PARTIELS

L'Eurocode 3 introduit, dans les vérifications vis-à-vis des états limites ultimes et des états limites de service, des facteurs partiels de sécurité établis selon des méthodes qui tiennent compte des incertitudes.

Incertitudes

L'origine et la nature des principales incertitudes sont les suivantes :

- incertitudes sur les actions : intensité maximale, durée, manière d'agir (dynamique plutôt que statique), points d'application, représentation schématique, etc. ;
- incertitudes sur les propriétés mécaniques des matériaux : composition chimique, défauts internes, dispersion des qualités mécaniques sur la section, effets de laminage, contraintes internes, etc. ;
- modifications des propriétés avec le temps : vieillissement, effets de la corrosion, etc. ;
- incertitudes sur les dimensions : tolérances de fabrication, d'implantation et de montage ;
- incertitudes sur les calculs : hypothèses simplificatrices, éléments négligés, calcul approximatif, modélisation approximative, etc.

On ne confondra pas les *incertitudes* avec les *erreurs* (par exemple : faute de calcul, charge oubliée, matériau incorrect, faute d'exécution, etc.).

Le formalisme de vérification pour tous les états limites implique que les actions et les résistances soient pondérées par des facteurs partiels de sécurité.

Valeurs caractéristiques et de calcul des actions

La principale valeur représentative d'une action est sa valeur caractéristique notée F_k . C'est la valeur ayant une probabilité déterminée pour que les valeurs effectives lui soient inférieures au cours d'une période de référence donnée.

La valeur de calcul F_d d'une action est exprimée en termes généraux par la formule :

$$F_d = \gamma_F \cdot F_k$$

où F_k est la valeur caractéristique (non pondérée) de l'action et γ_F est le coefficient partiel de sécurité pour l'action considérée qui tient compte de la possibilité d'un dépassement dans un sens défavorable du niveau d'intensité de l'action et aussi des incertitudes concernant le calcul des sollicitations et de l'état limite considéré.

La sollicitation de calcul S_d résulte de l'effet des actions, noté E_d , déterminé par une méthode d'analyse appropriée à partir des valeurs de calcul combinées de ces actions $S_d = E_d = E (\gamma_F \cdot F_k)$. Les combinaisons d'actions sont différentes pour les vérifications aux ELU et aux ELS.

Valeurs caractéristiques et de calcul des résistances

Les propriétés des matériaux sont généralement représentées par des valeurs nominales utilisées en tant que valeurs caractéristiques (non pondérées). Pour les structures en acier, la valeur caractéristique de résistance est notée R_k .

La résistance de calcul (pondérée) R_d est déterminée à partir des valeurs caractéristiques des propriétés du matériau et des données géométriques

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M}$$

R_k est la valeur caractéristique de la résistance considérée ;
 γ_M est le coefficient partiel pour la résistance considérée.

Format général de la sécurité

Condition fondamentale de sécurité.

$$S_d < R_d$$

S_d = sollicitations de calcul

R_d = résistances de calcul

Format semi-probabiliste

$$E_d = E (\gamma_F \cdot F_k) < \frac{R_k}{\gamma_M}$$

E_d = valeur de calcul des effets des actions

E = effets des actions

γ_F = coefficient partiel sur les actions

γ_M = coefficient partiel sur les résistances

Actions

Une action (F) est :

- une force appliquée à la structure (action directe) ;
- une déformation imposée (action indirecte).

Elles sont précisées dans l'Eurocode EN 1991 (dit « EC 1 », 2001), sauf les actions sismiques qui le sont dans l'Eurocode EN 1998 (dit « EC 8 », sept. 2005).

CLASSIFICATION DES ACTIONS

Nous pouvons les classer :

- en fonction de leurs variations dans le temps :
 - les actions permanentes (G), telles que le poids propre des structures, des équipements fixes, etc.,
 - les actions variables (Q), telles que les charges d'exploitation, l'action du vent, l'action de la neige, etc.,
 - les actions accidentelles (A), telles que les explosions, les chocs de véhicule, etc. ;

- en fonction de leurs variations dans l'espace :
 - les actions fixes,
 - les actions libres, pouvant avoir différentes dispositions géométriques, par exemple les charges d'exploitation mobiles, l'action du vent, de la neige, etc. ;

- selon leur nature et/ou la réponse structurale, par exemple statique ou dynamique.

VALEURS DES ACTIONS

Les principales valeurs représentatives (Frep) des actions sont :

- la valeur caractéristique $F_k (G_k, Q_k, A_k)$;

- la valeur de combinaison, représentée par le produit $\Psi_0 \cdot Q_k$

Les valeurs de combinaison sont associées à l'emploi de combinaisons d'action, afin de prendre en compte la probabilité réduite d'une occurrence simultanée des valeurs les plus défavorables de plusieurs actions variables indépendantes ;

- la valeur fréquente, représentée par le produit $\Psi_1 \cdot Q_k$

Elle est déterminée de façon à limiter à une valeur donnée la durée totale pendant laquelle elle est dépassée, au cours d'un intervalle de temps donné ;

- la valeur quasi-permanente, représentée par le produit $\Psi_2 \cdot Q_k$
- Elle est déterminée de manière à ce qu'au cours d'un intervalle de temps donné, le temps total pendant lequel elle est dépassée, représente une partie considérable de l'intervalle de temps donné.

La valeur de combinaison, la valeur fréquente ou la valeur quasi-permanente représentent les valeurs d'accompagnement ($\Psi \cdot Q_k$) d'une action variable qui, dans une combinaison d'actions, accompagne l'action variable dominante.

Ces valeurs représentatives servent à définir les valeurs de calcul des actions utilisées ensuite dans la composition des combinaisons d'actions :

$$F_d = \gamma_F \cdot F_k \text{ ou}$$

$$F_d = \gamma_F \cdot \Psi \cdot F_k$$

Cf. Eurocode 1, tableaux des valeurs recommandées des coefficients Ψ pour les bâtiments.

Combinaisons d'actions

Les combinaisons d'actions sont des ensembles, constitués d'actions à considérer simultanément dans les calculs, qui permettent de vérifier la fiabilité d'une structure pour un état limite spécifié, soit ultime, soit de service.

Les combinaisons d'actions réglementaires possibles sont très nombreuses. Il est admis de n'étudier que celles qui apparaissent comme ayant manifestement les effets les plus défavorables.

COMBINAISONS POUR ÉTATS LIMITES ULTIMES

Situation de projet durable et transitoire

Les combinaisons d'actions de ces situations sont les combinaisons fondamentales.

Elles comprennent :

- les valeurs de calcul des actions permanentes ($\gamma_{G,j} G_{k,j}$)
- la valeur de calcul d'une action variable dominante ($\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$)
- et, s'il y a lieu, les valeurs de combinaison de calcul des actions variables d'accompagnement : ($\sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$)

La combinaison d'actions peut s'exprimer :

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{ "+" } \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

où : "+" signifie « doit être combiné à ».

Dans le cas où la vérification de l'équilibre statique inclut également la résistance d'éléments structuraux, il est possible d'adopter une vérification combinée, où

$$\gamma_{G,j,\text{sup}} = 1,35 \text{ ou}$$

$$\gamma_{G,j,\text{inf}} = 1,15 \text{ si l'action est favorable}$$

$$\gamma_{Q,1} = 1,5 \text{ ou}$$

$$\gamma_{Q,1} = 0 \text{ si l'action est favorable}$$

Donc les combinaisons fondamentales aux ELU seront :

$$\sum_{j \geq 1} 1,35 G_{k,j} + 1,5 Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} 1,5 Q_{k,i}$$

actions permanentes + action variable dominante + actions variables d'accompagnement.

Situation de projet accidentelle

Les combinaisons d'actions pour les situations de projet accidentelles comprennent :

- les actions permanentes : $\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j}$, avec $\gamma_{G,j} = 1$
- une action accidentelle explicite A_d
- les actions variables avec leurs valeurs d'accompagnement.

La combinaison d'actions peut s'exprimer par

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{ "+" } A_d \text{ "+" } (\psi_{1,1} \text{ ou } \psi_{2,1}) Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

actions permanentes + action accidentelle + action variable dominante + actions variables d'accompagnement.

COMBINAISONS POUR ÉTATS LIMITES DE SERVICE

Pour les états-limites de service, dans les combinaisons d'actions il convient de prendre pour les coefficients partiels des actions la valeur de 1. Les combinaisons réglementaires sont :

- les combinaisons caractéristiques
Elles comprennent :
– les actions permanentes :
 $\sum_{j \geq 1} G_{k,j}$

– une action variable dominante : $Q_{k,1}$

- des actions variables d'accompagnement avec leurs valeurs de combinaisons :
 $\sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

La combinaison d'actions peut s'exprimer par :
 $\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ "+" } Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

- les combinaisons fréquentes
Elles comprennent :
– les actions permanentes :
 $\sum_{j \geq 1} G_{k,j}$

– une action variable dominante avec sa valeur fréquente : $\psi_{1,1} Q_{k,1}$

- autres actions variables avec leurs valeurs quasi-permanentes :
 $\sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$

La combinaison d'actions peut s'exprimer par :
 $\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ "+" } \psi_{1,1} Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$

- les combinaisons quasi-permanentes

Elles comprennent :
– les actions permanentes :
 $\sum_{j \geq 1} G_{k,j}$

– une ou plusieurs actions variables avec leurs valeurs quasi-permanentes :
 $\sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$

La combinaison d'actions peut s'exprimer par :
 $\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ "+" } \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$

Résistance de calcul

La résistance de calcul (pondérée) R_d est déterminée à partir des valeurs caractéristiques des propriétés du matériau et des données géométriques :

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M}$$

R_k est la valeur caractéristique de la résistance considérée ;
 γ_M est le coefficient partiel pour la résistance considérée.

Il convient d'appliquer les coefficients partiels γ_M aux diverses valeurs caractéristiques de résistance de la façon suivante :

- résistance des sections transversales, quelle que soit la classe de la section : γ_{M0}
- résistance des barres aux instabilités évaluée par vérifications de barres : γ_{M1}
- résistance à la rupture des sections transversales en traction : γ_{M2}

Pour ces coefficients, les valeurs numériques suivantes sont recommandées pour les bâtiments :

$$\begin{aligned} \gamma_{M0} &= 1 \\ \gamma_{M1} &= 1 \\ \gamma_{M2} &= 1,25 \end{aligned}$$

Analyse globale

PRINCIPES

Pour les vérifications d'une ossature, celle-ci doit être considérée en premier lieu dans sa globalité. Cette ossature spatiale sera ensuite décomposée en plusieurs structures planes qui seront traitées d'une manière indépendante.

Si l'on considère la structure principale de résistance, dans la plupart des cas elle se présente sous la forme d'un portique constitué d'une traverse, de poteaux, de nœuds et de pieds de poteaux (soit les éléments structuraux du portique). Pour les vérifications, le portique sera considéré avant tout dans sa globalité et puis comme la juxtaposition d'éléments de structure.

En tant que système statique global, ce portique est soumis à divers types d'action. Il fait l'objet d'un calcul statique (appelé analyse globale dans les Eurocodes) qui consiste dans la détermination de la valeur et de la répartition des sollicitations associées à chaque état limite. Donc, le rôle de l'analyse globale est de déterminer l'état de la structure soumise aux actions de calcul.

Connaissant les sollicitations, on procède ensuite aux différentes vérifications des éléments, sections, assemblages. Pour vérifier les éléments individuellement, on considère la structure comme une suite d'éléments dont les interactions (liaisons, charges, sollicitations) entre éléments adjacents doivent être ressorties. Cela ne peut se faire qu'au terme de l'analyse globale, une fois les sollicitations connues.

Afin de vérifier la sécurité des barres individuelles, celles-ci seront isolées du portique pour être traitées comme des sous-structures, indépendantes. Les conditions d'extrémité des barres devront alors être compatibles avec les conditions de déformation des barres du portique (par exemple en supposant les extrémités articulées) et les effets de l'interaction aux extrémités des barres devront être pris en compte en appliquant les efforts d'extrémité (les forces de liaison).

MÉTHODES D'ANALYSE

Dans une structure isostatique, les sollicitations sont obtenues en utilisant les équations de la statique. Pour une structure hyperstatique, les sollicitations peuvent être déterminées par l'une des méthodes d'analyse suivantes :

- analyse globale élastique ;
- analyse globale plastique.

L'analyse globale élastique est fondée sur l'hypothèse d'un comportement contrainte-déformation du matériau élastique linéaire.

EFFETS DE LA DÉFORMATION GÉOMÉTRIQUE

Une structure, sous un chargement quelconque, subit des déformations dont les effets peuvent être pris ou non en compte pour déterminer un complément de chargement.

Les sollicitations peuvent ainsi être déterminées en fondant la méthode d'analyse globale sur l'une des théories suivantes :

- théorie du premier ordre, se référant à la géométrie initiale de la structure : le calcul statique au premier ordre admet que la déformée prise par la structure chargée reste sans effet significatif sur le mode d'action des forces et les sollicitations ;
- théorie du second ordre, prenant en considération l'influence de la déformation de la structure.

ANALYSE ÉLASTIQUE AU PREMIER ORDRE

Dans une analyse élastique au premier ordre on suppose que la relation entre les actions et les sollicitations (efforts intérieurs) est linéaire. La répartition des efforts dans le portique se fait au *pro rata* des seules rigidités flexionnelles élastiques des éléments qui le constituent. On suppose, de plus, que la valeur et la distribution des sollicitations dans les éléments du portique ne sont pas modifiées par les déplacements du portique.

Les sollicitations (les efforts intérieurs) ainsi déterminées dépendent alors directement (et dans une relation linéaire) de la charge extérieure appliquée à la structure. En conséquence, lors d'un calcul élastique au premier ordre, le principe de superposition des efforts est applicable. En d'autres termes, la répartition de l'ensemble des efforts intérieurs est la superposition des effets correspondant aux actions individuelles. Cette démarche s'avère très utile lorsqu'une même action intervient dans les états limites différents, avec des valeurs différentes du coefficient partiel de sécurité.

Un tel calcul qui permet la superposition des efforts, est couramment utilisé pour la plupart des éléments structurels de construction métallique.