

III-1- Introduction :

Ce chapitre comporte deux parties, le but est la présentation de la méthode des éléments finis et l'utilisation d'un logiciel éléments finis (Présentation du programme de calcul ABC : ArcelorMittal Beams calculator).

Dans la première partie, on a définir la méthode des éléments finis, On y expose aussi les Domaines d'application, Principes de la MEF, Modélisation et discrétisation, et finalement comment utiliser un programme des éléments finis.

La deuxième partie Présente Le programme du calcul ABC : (ArcelorMittal Beams calculator), Propriétés des matériaux, aussi Le calcul des efforts et des flèches est effectué à l'aide d'un modèle de type "éléments finis", le calcul du coefficient d'amplification critique μ_{cr} pour le mode d'instabilité par déversement de la poutre, et finalement Calculs effectués en phase de construction et en phase définitive.

Première partie : Méthode de calcul

III-2- la Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis qui est une technique mathématique d'intégration des équations aux dérivées partielles mises sous forme variationnelles. Elle fait appel aux trois domaines suivants :

- Sciences de l'ingénieur pour construire les équations aux dérivées partielles.
- Méthodes numériques pour construire et résoudre les équations algébriques.
- Programmation et informatique pour exécuter efficacement les calculs sur ordinateur.

Est la méthode qui revient à remplacer le système continu par un système discret. Le solide est alors divisé en un certain nombre de sous-domaines appelés éléments, dont l'assemblage permet la reconstitution de la géométrie initiale. Chacun des éléments est relié à ces voisins par des nœuds dont les degrés de liberté(DDL) constituent les inconnues du problème [17].

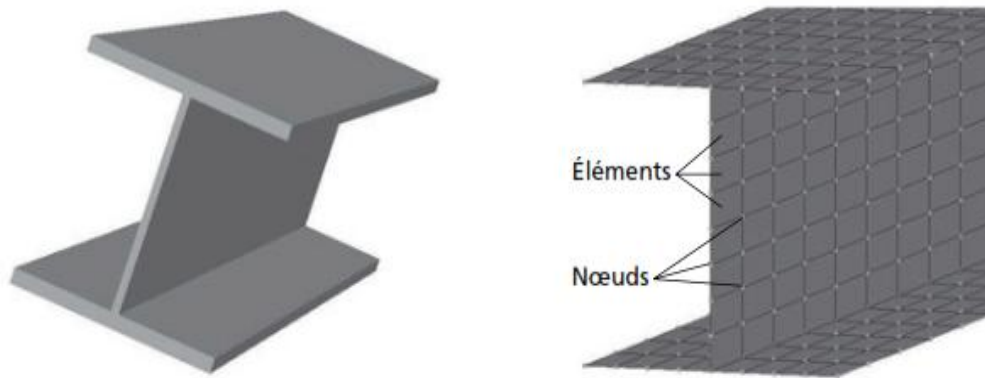


Figure III.1 : a) Solide (Poutre en I) ; b) Modèle éléments finis [17]

III-3- Démarche éléments finis :

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, qui sont détaillées par la suite, sont les suivantes [20]:

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines ;
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- Assemblage des matrices élémentaires ;
- Prise en compte des conditions aux limites ;
- Résolution du système d'équations.

III-4- Domaines d'application de la MEF :

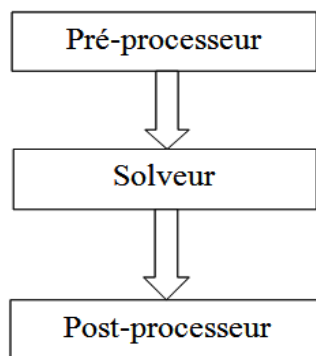
- Analyse linéaire (statique et dynamique) [21].
- Analyse non linéaire (grandes déplacements, grandes déformation, frottement...).
- Génie civil.
- Génie mécanique.
- Thermique (en régime permanent et transitoire,...).
- Mécanique des fluides.
- Electromagnétisme.
- Dynamique rapide (choc, impact,...).
- Optimisation des structures.
- Nucléaire.
- Militaire.
-

III-5- Principes de la MEF :

- La MEF est basée sur une idée simple : subdiviser (discrétiser) une forme complexe en un grand nombre de sous-domaines élémentaires de forme géométrique simple (éléments finis) interconnectés en des points appelés nœuds.
- Nous considérons le comportement mécanique de chaque élément séparément, puis nous assemblons ces éléments de telle façon que l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements soient satisfaits en chaque nœud.
- La MEF utilise des approximations simples des variables inconnues dans chaque élément pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques.
- Les nœuds et les éléments n'ont pas forcément de signification physique particulière, mais sont basés sur des considérations de précision de l'approximation.

III-6- Etapes pratiques du calcul par EF :

Organisation générale d'un code de calcul [19] :



- **Pré-processeur** (Analyse du problème)
 - Choisir le type d'éléments.
 - Entrer les propriétés géométriques.
 - Entrer les paramètres physiques.
 - Créer le modèle géométrique.
 - Créer le maillage : définir les nœuds et les éléments.
 - Appliquer les sollicitations.
 - Imposer les conditions aux limites.

➤ **Solveur** (Vérification des données)

- Choisir le type d'analyse (statique, dynamique,...).
- Construire la matrice et le vecteur élémentaire $[k^e]$, $\{f^e\}$.
- Assembler $[k^e]$ et $\{f^e\}$ dans $[K]$ et $\{F\}$.
- Prendre en compte les conditions aux limites.
- Résoudre le système d'équations $[K] \{U\} = \{F\}$.
- Calculer les variations additionnelles (gradients, réactions, σ , ϵ ...).

➤ **Post-processeur** (Vérification des calculs)

- Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique.
- sous forme numérique.
- sous forme graphique.
- Effectuer des fonctions complémentaires : combinaisons, interprétations, interpolations, animation, ...

III-7- Modélisation et discrétisation :

La méthode des éléments finis est donc une procédure générale de discrétisation pour la résolution des problèmes des milieux continus. Donc pour avoir une analyse numérique qui simulera au mieux un problème il faut effectuer deux opérations essentielles la modélisation et la discrétisation, ces opérations se font en deux temps [18].

- La modélisation
- La discrétisation ensuite

et portent sur les deux aspects principaux du problème pratique.

- Représentation de la géométrie, des charges, des conditions aux limites
- Choix des éléments finis et du maillage.

Ici on explique ces opérations en considérant le problème pratique de l'étude d'une structure, au sens large.

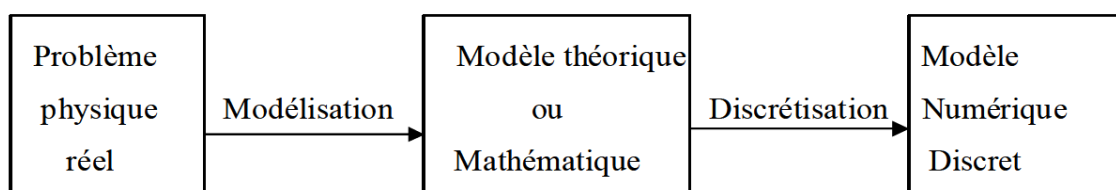


Figure III.2 : Etape de l'analyse d'un problème aux limites [18]

III-8- Importance de la modélisation :

La modélisation est l'étape clé de toute analyse, elle consiste à rattacher la structure réelle à un modèle connu de la mécanique des solides, structures et matériaux qui sont capable d'en décrire le fonctionnement avec une précision convenable. Donc pratiquement la modélisation consiste [18]:

En ce qui concerne la structure, à ramener cette dernière à une géométrie en choisissant des axes (barre, poutre câble), des plans (parois, plaques coques), des volumes (solides) après avoir éliminé certains détails (gousset, petites excentricités), à choisir la théorie la plus appropriée à cette géométrie pour définir les conditions d'appuis et les charges.

Choisir de façon réaliste les lois constitutives des matériaux décrivant aussi bien les réponses mécaniques classiques, (linéaires anisotropes discontinuité) que les phénomènes physiques (teneur en eau, discontinuité, perméabilité), à déterminer les propriétés qui définissent ces lois et à connaître l'état initial des matériaux (contraintes initiales).

III-9- Discrétisation d'une structure mathématique :

La discrétisation fournit un modèle numérique à partir du modèle mathématique, donc l'opération de discrétisation est aussi importante que celle de la modélisation. Pour discrétiser, on subdivise la structure en éléments dont les caractéristiques et la forme dépendent de la modélisation.

La principale difficulté de la méthode des éléments finis se situe au niveau de la formulation des éléments (forme de l'élément, nombre de nœuds et de degré d'interpolation) [20].

III-10- Utilisation d'un logiciel éléments finis :

Un programme général de type industriel doit être capable de résoudre des problèmes variés de grandes tailles (de mille à plusieurs centaines de milliers de variables). Ces programmes complexes nécessitent une bonne maîtrise, de l'analyse du problème et des résultats obtenus, avant d'espérer pouvoir modéliser un problème réel de façon correcte. Les possibilités offertes par de tels logiciels sont nombreuses :

- Analyse linéaire ou non d'un système physique continu,
- Analyse statique ou dynamique,
- Prise en compte de lois de comportement complexes,
- Prise en compte de phénomènes divers (élasticité, thermiques, électromagnétiques, de

Plasticité, d'écoulement, etc. ...) ceux-ci pouvant être couplés,

- Problèmes d'optimisation,
- etc.

L'utilisation de tels logiciels nécessite une formation de base minimum. La mise en œuvre pratique sur des cas tests (si possible simples) permettra de savoir comment modéliser et analyser différents éléments d'un problème plus complexe. Avant de passer à la pratique, précisons comment se déroule une étude basée sur l'utilisation d'un logiciel éléments finis.

III-10-1- Déroulement d'une étude :

Pour réaliser une étude par éléments finis, il faut que les objectifs de l'étude soient bien définis (statique ou dynamique, élastique ou plastique, thermique, le type de matériaux, les charges appliquées ...). Le cadre de l'étude, c'est à dire le temps et les moyens disponibles, doit être compatible avec les objectifs et la précision cherchée. Supposons ces conditions remplies (ce qui est rarement le cas), l'étude est organisée de façon logique selon les étapes suivantes :

III-10-1-1- Analyse du problème:

Cette analyse conduit à préciser, un certain nombre d'hypothèses (choix qui conditionnent les résultats). Basée sur l'expérience personnelle, elle dépend de nombreuses considérations. La difficulté essentielle est de trouver un bon compromis entre les paramètres propres au problème et ceux relatifs à l'environnement de travail (liés à la connaissance du logiciel). L'analyse du problème nous conduit à préciser un certain nombre d'hypothèses, et à effectuer des choix qui conditionnent les résultats.

a) Choix du modèle:

En calcul des structures, les plus classiques sont de type : poutre, élasticité plane, axisymétrique, coques mince ou épaisse, tridimensionnel, ... à ces modèles mathématiques correspondent des familles d'éléments finis.

b) Choix du type d'éléments:

On choisira les éléments les mieux adaptés dans les familles disponibles, en fonction de la précision voulue, de la nature du problème, mais aussi du temps disponible, et de la connaissance de ces éléments.

c) Choix du maillage:

Il dépend essentiellement des outils dont on dispose pour réaliser ce maillage. Il faut tenir compte de la géométrie (simplification de la DAO), des sollicitations extérieures (prévoir les surfaces, lignes, points de chargement), des conditions aux limites à imposer, mais aussi des informations recherchées locales ou globales.

d) Hypothèses de comportement:

Quel modèle retenir pour représenter le comportement du matériau. Faut-il effectuer le calcul en élastique linéaire, élastoplastique, viscoplastique ? Comment modéliser les liaisons, les contacts, les jeux? Peut-on utiliser une méthode d'homogénéisation (matériau hétérogène ou composite)? Peut-on traduire l'incompressibilité d'un milieu (modélisation du caoutchouc) ?

Lors d'une étude, on peut être amené à utiliser des éléments finis nouveaux. Il est indispensable de vérifier leur comportement sur des problèmes élémentaires si possible proches de l'étude menée. L'ouvrage « Guide de validation des progiciels de calculs des structures, AFNOR technique 1990 » contient des cas tests pouvant servir pour de nombreux problèmes. Ces cas tests permettent de comparer la solution obtenue avec d'autres solutions numériques ou analytiques.

Ce travail préliminaire est utile pour former sa propre expérience et permet de valider l'utilisation du modèle testé.

III-10-1-2- Création et vérification des données :

Cette étape dépend du logiciel utilisé. La syntaxe utilisée pour définir le jeu de données est définie dans le mode d'emploi du bloc fonctionnel correspondant. En sortie, un fichier est créé, qui contient toutes les informations nécessaires à l'exécution des calculs. Les vérifications relatives au jeu de données se font généralement graphiquement, grâce à un module informatique appelé pré-processeur.

Différents contrôles peuvent être utilisés pour valider le jeu de données :

- Vérification de la géométrie de la pièce et du maillage;
- Vérification de la prise en compte des sollicitations et des conditions cinématiques (liaisons) imposées à la structure;
- Vérification des propriétés mécaniques utilisées.

Pour des problèmes spécifiques, d'autres contrôles seront envisagés. L'objectif d'éviter de faire tourner un calcul inutilement. Ceci d'autant plus que la recherche d'une solution acceptable pour un problème donné est rarement le résultat d'un seul calcul.

III-10-1-3- Exécution du calcul :

Ce bloc, le plus coûteux en temps machine est souvent exécuté en tâche de fond. Un fichier de résultats permet de vérifier que les différentes phases de calculs se sont correctement déroulées :

- Interprétation des données, vérification des paramètres manquants ;
- Construction des matrices, espace utile pour les gros problèmes ;
- Singularité de la matrice raideur, problème de conditions aux limites ou de définition des éléments;
- Convergence, nombre d'itérations, etc.

Ce fichier peut contenir aussi les résultats du calcul (déplacements, résidus, contraintes...) ce qui lui confère dans ce cas un volume généralement très important. Il peut arriver que le calcul échoue. Les principales sources d'erreurs généralement observées à ce niveau sont listées dans le tableau III.1.

"erreurs"	"causes"	"remèdes"
Singularité de [K]	éléments mal définis, existence de modes rigides, intégration numérique.	modifier la topologie du maillage, modifier les liaisons, modifier le nombre de points d'intégration.
Résolution des équations	Arrondi numérique, Non convergence.	travailler en double précision, changer d'algorithme, augmenter le nombre d'itérations.

Tableau III.1 : Principales sources d'erreurs durant le calcul [20]

III-10-1-4- Exploitation des résultats :

Les calculs demandés dans le cahier des charges ont le plus souvent pour objectif de valider ou de vérifier le dimensionnement d'une structure. Les résultats obtenus et les conclusions relatives aux phénomènes à étudier devront être présentés de façon synthétique : tableaux, courbes, visualisation. Cela justifie largement l'utilisation d'un post-processeur, qui propose des outils pour sélectionner les informations que l'on veut étudier.

Attention, lors de l'utilisation de ces outils, il faut savoir ce que cache l'information qui vous est proposée graphiquement, sachant que celle-ci est construite à partir de résultats discrets :

- Valeur moyenne sur un élément: comment est-elle définie?
- Valeur maximale sur l'élément: comment est-elle calculée?
- Valeurs aux nœuds (écarts entre les éléments): à quoi correspondent-elles?
- Les courbes d'iso-contraintes ont-elles une signification? etc.

Différentes vérifications doivent être effectuées pour valider les résultats. Elles poussent, dans la plupart des cas, à remettre en cause le modèle pour en créer un nouveau, dont on espère qu'il améliorera la solution précédente.

Pour valider une solution, il faut procéder dans l'ordre, en estimant dans un premier temps la précision du modèle. Puis lorsque celle-ci est jugée suffisante, nous procédons à sa validation. Les indicateurs sur la précision du modèle sont généralement locaux. Ils concernent des informations élémentaires calculées aux nœuds ou aux points d'intégration, ces informations sont très souvent fournies en valeur moyenne sur l'élément. Les indicateurs locaux sur la précision d'un modèle mécanique peuvent être :

- Discontinuité des contraintes entre des éléments adjacents. Le plus simple, pour un matériau isotrope, est de visualiser la contrainte équivalente de Von Mises, cela permet d'avoir une idée des zones fortement chargées ayant un fort gradient de contrainte. Ces zones seront l'objet de toute notre attention ;
- Valeur du tenseur des contraintes sur les bords libres (certaines valeurs doivent être nulles).
- En pratique, il faudra estimer ces valeurs à partir des valeurs obtenues aux points d'intégration;
- Densité d'énergie interne de déformation sur chaque élément, l'idéal étant d'avoir un écart le plus faible possible.

Ayant les informations sur la qualité de la solution, différents contrôles peuvent être envisagés pour valider votre modèle :

- Ordre de grandeur des résultats obtenus;
- Vérification des hypothèses du modèle;
- Justification des choix de départ.

La comparaison des résultats des différents modèles permet d'améliorer puis de valider un modèle final. Une fois la fiabilité du modèle assurée, on peut conclure sur l'adéquation entre la

structure et le cahier des charges. La synthèse de ces calculs préliminaires est indispensable car elle vous permet de justifier et de définir les limites du (des) modèle(s) retenu(s).

Deuxième partie : Logiciel de calcul

III-11- Présentation du programme de calcul ABC : (ArcelorMittal Beams calculator)

Le présent logiciel facilite les travaux d'étude préliminaires dans le cadre de la conception de construction métallique. Sur base de méthodes de calcul selon les principes des normes appliquées, il permet d'effectuer un certain nombre de vérification dans le but de pouvoir évaluer une solution dans le cadre d'un pré dimensionnement. Le logiciel ne permet pas d'analyser toutes les situations et d'effectuer d'une façon exhaustive tous les calculs justificatifs requis pour une étude d'exécution qui nécessite dans tous les cas le recours au conseil d'un bureau d'Etudes.

Le programme effectue des vérifications de résistance aux Etats Limites Ultimes (résistance en section, voilement, déversement) selon les principes des Eurocodes 3 et 4 (EN 1993-1-1 et EN 1994-1-1). Pour les calculs en situation d'incendie, il est fait référence à l'EN 1993-1-2 et à l'EN 1994-1-2. Dans sa version actuelle, le programme ne fait référence à aucune Annexe Nationale. Les valeurs recommandées dans les EN 1993 et EN 1994 sont appliquées.

Les vérifications sont réalisées pour des combinaisons d'actions définies par l'utilisateur. Dans la note de résultats, les critères de résistance sont généralement présentés sous la forme d'un rapport d'un effort agissant (Ed) à l'effort résistant correspondant (Rd). Par exemple, pour le moment fléchissant :

$$T_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \dots\dots\dots (III-1)$$

Ainsi, la condition de résistance est satisfaite si la valeur de ce rapport est inférieure ou égale à 1. Pour les poutres mixtes, on distingue la phase de construction et la phase définitive. Pour les poutres acier, on ne se reportera qu'aux vérifications en phase définitive.

III-12- Propriétés des matériaux :

III-12-1- Acier de construction :

Le module d'élasticité longitudinale est : $E = 210000 \text{ N/mm}^2$;

Le module de cisaillement est : $G = 80770 \text{ N/mm}^2$;

La limite d'élasticité est déterminée en fonction de la nuance et de la valeur maximale de l'épaisseur de la semelle et de l'épaisseur de l'âme (il s'agit normalement de l'épaisseur de la semelle), selon la Référence [27] (Tableau ci-dessous).

Nuance	EN 10025-2			EN 10025-4
	S235	S275	S355	S460
$t < 16 \text{ mm}$	235	275	355	460
$16 \text{ mm} < t \leq 40 \text{ mm}$	225	265	345	440
$40 \text{ mm} < t \leq 63 \text{ mm}$	215	255	335	430
$63 \text{ mm} < t \leq 80 \text{ mm}$	215	245	325	410
$80 \text{ mm} < t \leq 100 \text{ mm}$	215	235	315	400
$100 \text{ mm} < t \leq 150 \text{ mm}$	195	225	295	385

Tableau III.2 : Limite d'élasticité en fonction de l'épaisseur [27].

*Selon l'EN 10025-4, l'épaisseur maximale n'est pas de 150 mm, mais de 120 mm.

III-12-2- Béton :

Les propriétés du béton :

- ✓ la valeur caractéristique de la résistance en compression (f_{ck}),
- ✓ le module sécant (E_{cm}).

Sont déterminées selon l'EN 1992-1-1 § 3 [23].

Les coefficients d'équivalence sont calculés selon l'EN 1994-1-1 § 5.4.2 [26].

III-13- Calcul des efforts :

Le calcul des efforts et des flèches est effectué à l'aide d'un modèle de type "éléments finis" qui utilise une matrice de rigidité de type "Poutre" à 3 degrés de liberté par nœud.

La poutre est discrétisée en un certain nombre d'éléments en tenant compte des changements de section (renfort sous semelle inférieure) et de la présence de charges concentrées.

Les déplacements de chaque nœud sont calculés, et les efforts sont déterminés aux extrémités de chaque élément. L'analyse de la poutre est ainsi effectuée pour chaque cas de charges avec le coefficient d'équivalence acier-béton approprié.

Selon les options de sorties sélectionnées, les données et les résultats détaillés peuvent apparaître dans la note de résultats pour chaque analyse.

III-14- Calcul du coefficient d'amplification critique pour le déversement :

Le logiciel effectue le calcul du coefficient d'amplification critique μ_{cr} pour le mode d'instabilité par déversement de la poutre, pour chaque combinaison de charges aux Etats Limites Ultimes lorsque le déversement est un mode potentiel de ruine. Ce calcul est effectué en faisant appel au module LTBeam développé par le CTICM [31]. Il s'agit d'une recherche du mode propre fondamental d'instabilité élastique sur un modèle constitué d'éléments finis de type « poutre » à quatre degrés de liberté par nœud :

- ✓ déplacement latéral
- ✓ rotation dans le plan horizontal
- ✓ rotation autour de l'axe longitudinal de la poutre
- ✓ gauchissement

Pour une poutre à section constante, le moment critique M_{cr} peut être calculé par :

$$M_{cr} = \mu_{cr} M_{Ed} \dots \dots \dots (III - 2)$$

Où :

M_{Ed} : est le moment maximal sur la longueur de la poutre.

Le calcul tient compte de la forme du diagramme du moment fléchissant, des conditions de maintien latéral de la poutre. Le gauchissement des sections est libre aux extrémités de la poutre. A l'exception du poids propre de la poutrelle, toutes les charges sont supposées être appliquées au niveau de la semelle supérieure.

Dans le cas d'une poutre mixte en phase de construction, il est tenu compte, le cas échéant, de la position du point d'application de la réaction d'appui des étais sous la semelle inférieure.

Pour les poutres partiellement enrobées, la rigidité en flexion par rapport à l'axe de faible inertie, ainsi que la rigidité en torsion sont calculées en tenant compte de la section d'enrobage en béton. L'inertie de gauchissement est celle de la section acier seule.

III-15- Calculs effectués en phase de construction :

Les calculs en phase de construction ne concernent que les poutres mixtes.

Si la poutre est considérée comme "totalement" étayée en phase de construction, aucun calcul n'est effectué. Dans le cas contraire, les vérifications suivantes sont effectuées en phase de construction, en différents points le long de la poutre :

- ✓ résistance en flexion,
- ✓ résistance à l'effort tranchant.

La résistance au déversement est vérifiée si la poutre n'est pas considérée comme maintenue latéralement de façon continue.

Aucune vérification de résistance au déversement n'est effectuée.

Les flèches sont calculées pour chaque cas de charges, en phase de construction.

III-15-1- Analyse de la poutre :

L'analyse globale de la poutre est effectuée pour chacun des cas suivants :

- a) poids propre de la poutre et de la dalle (g)

Il est tenu compte du poids de la poutrelle, du renfort (éventuel), du béton d'enrobage (éventuel) et du poids de la dalle de béton. Rappelons que le poids de la dalle peut être représenté par des charges concentrées définies par l'utilisateur.

- b) charge de construction (Q_c)

La charge de construction peut être une charge surfacique ou un ensemble de charges concentrées. Dans le cas d'une charge surfacique, la charge linéique correspondante en est déduite en considérant la demi-distance à la poutre voisine, ou la distance au bord de la dalle pour une poutre de rive.

Pour une poutre avec console à gauche et/ou à droite, au maximum 3 dispositions de la charge de construction sont envisagées en fonction de la géométrie de la poutre et des appuis provisoires.

III-15-2- Résistance en flexion :

La résistance en flexion de la poutre est vérifiée après détermination de la classe de la section :

Classe 1 ou 2 : résistance plastique

Classe 3 : résistance élastique

Classe 4 : résistance élastique de la section efficace

La classe de la section tient compte, le cas échéant, de l'enrobage en béton qui a un effet favorable sur la résistance au voilement local, selon l'EN 1994-1-1 § 5.5.3 [26].

III-15-3- Résistance à l'effort tranchant :

La résistance à l'effort tranchant est :

- l'effort tranchant plastique pour les âmes peu élancées,
- la résistance au voilement par cisaillement pour les âmes dont l'élancement dépasse $72\varepsilon / \eta$

Avec :

$$M_{f_i, \theta, Rd} = \frac{K_{y\theta} M_{Rd} \gamma_{M0}}{\gamma_{M, f_i}} \dots \dots \dots (III - 4)$$

- $M_{f_i, \theta, Rd}$ est la valeur de calcul du moment résistant à la température θ ;
- M_{Rd} est la valeur de calcul du moment résistant à température normale suivant l'EN 1993-1-1 ;
- $K_{y, \theta}$ est le coefficient de réduction de la limite d'élasticité à la température θ .

Aussi : $\eta = 1,2$; et $\varepsilon = (235 / f_y)^{0.5}$.

La résistance au voilement par cisaillement est calculée selon l'EN 1993 Partie 1.5 [25]. Il est considéré que pour les poutres partiellement enrobées, il n'y a aucun risque de voilement par cisaillement.

III-16- Calculs effectués en phase définitive :

Les calculs effectués en phase définitive concernent les poutres mixtes, mais aussi les poutres non mixtes.

En phase définitive, la résistance de la poutre est calculée en tenant compte de la participation de la dalle en béton pour les poutres mixtes. Les vérifications suivantes sont effectuées :

- ✓ résistance en flexion,

- ✓ résistance à l'effort tranchant,
- ✓ interaction moment fléchissant-effort tranchant,
- ✓ résistance au déversement,

Et pour les poutres mixtes :

- ✓ résistance des connecteurs,
- ✓ résistance au cisaillement de la dalle.

Ces vérifications sont effectuées en différents points sur la longueur de la poutre.

III-16-1- Largeur participante de la dalle (poutre mixte) :

Dans le cas d'une poutre mixte, la largeur participante de la dalle est déterminée selon l'EN 1994-1-1 § 5.4.1.2. Pour ce calcul, il est tenu compte de la présence des consoles dans le calcul de la distance entre points d'inflexion, cette distance étant déterminée en supposant une charge uniformément répartie sur toute la longueur de la poutre.

III-16-2- Analyse d'une poutre mixte avec participation de la dalle :

L'analyse d'une poutre en phase mixte est effectuée sur un modèle qui utilise la même discrétisation qu'en phase de construction. Les caractéristiques de chaque élément sont calculées en tenant compte de la dalle et de la variation de sa largeur participante. Celle-ci est calculée pour la section située au milieu de l'élément considéré.

Les analyses sous les actions permanentes sont effectuées pour une section homogénéisée avec un coefficient d'équivalence à long terme, les analyses sous les charges variables sont effectuées avec un coefficient d'équivalence à court terme.

Si la poutre est partiellement étayée en phase de construction, une analyse est effectuée afin de calculer l'effet du retrait des étais, en prenant un coefficient d'équivalence à long terme.

III-16-3- Résistance en flexion :

Pour une poutre mixte, la résistance à la flexion sont calculées à :

- La résistance élastique d'une section est vérifiée en calculant la contrainte normale en

différents points de la section mixte : contrainte de compression sur les fibres supérieures de la dalle, contrainte de traction dans les armatures de la dalle, contrainte dans les fibres supérieures de la poutrelle, contrainte dans les fibres inférieures de la poutrelle.

- La Résistance plastique Pour les sections de Classe 1 ou 2, le moment fléchissant est simplement comparé au moment de résistance plastique de la section. Pour une section mixte, la partie tendue est supposée fissurée et ne participe donc pas à la résistance en flexion.

III-16-4- Résistance à l'effort tranchant :

Pour une poutre mixte comme pour une poutre non mixte, la résistance à l'effort tranchant est calculée en considérant que l'effort tranchant est totalement repris par l'âme de la poutrelle.

Le risque de voilement par cisaillement est pris en compte comme décrit pour la phase de construction.

III-16-5- Résistance de la connexion pour une poutre mixte :

Si la méthode élastique est utilisée pour la vérification de la résistance en flexion d'une poutre mixte (sections de Classe 3 ou 4, connexion insuffisante...), la résistance des connecteurs est vérifiée selon la théorie élastique.

La poutre est découpée en un certain nombre de tronçons de longueur 50 cm à 1 m. Sur chaque tronçon, l'effort de cisaillement horizontal est calculé et comparé à la résistance des connecteurs disposés sur la longueur de ce tronçon.

III-16-6- Résistance au cisaillement de la dalle pour une poutre mixte :

Dans le cas d'une poutre mixte, la résistance au cisaillement longitudinal de la dalle est vérifiée selon une méthode plastique si le degré de connexion est suffisant, et si la classe maximale des sections sur la longueur de la poutre n'est pas supérieure à 2. Dans le cas contraire, c'est une méthode élastique qui est utilisée.

La résistance plastique est vérifiée pour différents tronçons sur la longueur de la poutre. Pour une dalle avec bac acier perpendiculaire à la poutre, le bac acier est pris en compte dans la résistance au cisaillement lorsqu'il n'est pas interrompu au droit de la poutre, selon l'EN 1994-1-1 § 6.6.6.4.

Le taux d'armatures transversales est estimé pour satisfaire le critère de résistance de la dalle. Conformément à l'EN 1994-1-1 §6.6.6.3, le taux minimal d'armatures transversales est calculé selon l'EN 1992-1-1 §9.2.2 [26]. Les taux minimaux d'armatures transversales sont estimés en supposant qu'il y a deux nappes d'armatures. Pour la nappe supérieure, dans le cas d'une dalle avec bac acier, le taux minimal est relatif à la partie de la dalle située au-dessus du

bac alors que pour la nappe inférieure, le taux minimal est évalué pour l'épaisseur totale de la dalle.

Pour la répartition et le positionnement des armatures, il convient d'adopter des dispositions constructives satisfaisantes, notamment en tenant compte des prescriptions de l'EN 1994-1-1 §6.6.5.

La vérification de la résistance au cisaillement longitudinal de la dalle est effectuée sur la base d'hypothèses qui correspondent à des cas courants selon l'EN 1994-1-1 § 6.6.6 et l'EN 1992-1-1 § 6.2.4.

III-17- Conclusion :

La méthode des éléments finis qui est une technique mathématique d'intégration des équations aux dérivées partielles mises sous forme variationnelles. Elle fait appel aux trois domaines suivants :

- ✓ Sciences de l'ingénieur pour construire les équations aux dérivées partielles.
- ✓ Méthodes numériques pour construire et résoudre les équations algébriques.
- ✓ Programmation et informatique pour exécuter efficacement les calculs sur ordinateur.

Le programme effectue des vérifications de résistance aux Etats Limites Ultimes (résistance en section, voilement, déversement) selon les principes des Eurocodes 3 et 4 (EN 1993-1-1 et EN 1994-1-1). Pour les calculs en situation d'incendie, il est fait référence à l'EN 1993-1-2 et à l'EN 1994-1-2. Dans sa version actuelle, le programme ne fait référence à aucune Annexe Nationale. Les valeurs recommandées dans les EN 1993 et EN 1994 sont appliquées.