



Hall d'essai, I.U.T. Département génie civil, 19300 EGLETONS

Les modalités d'évaluation sont les suivantes :

- 1 note de Travaux Pratiques + 1 note de contrôle sur table. La moyenne du module sera calculée avec ces notes. Les coefficients respectifs sont $\frac{1}{4} + \frac{3}{4}$
- Tous les documents de cours, de TD et de TP seront autorisés en contrôle des connaissances.
- Le contrôle de connaissances du module SST5 aura lieu en juin. Il est donc de la responsabilité de chaque étudiant de se préparer au mieux. Toutes les séances de TD sont déjà planifiées et vous aideront à organiser votre travail personnel.
- Le partiel, d'une durée de deux heures, permettra à chacun de valoriser son travail personnel sur les différentes thématiques abordées en cours. Les enseignants évalueront les copies, la correction aux questions du partiel sera faite individuellement sur la base de questions individuelles seulement.
- Un document format A3 présentant un plan de ferrailage de poutre en béton armé est fourni avec ce document. Il sert de support " fil rouge " de ce module. L'objectif est d'être capable de refaire le même document sur une étude de cas similaire en TD ou en partiel, en fin de semestre 2

Bibliographie :

- NF EN 1992-1-1 : <https://sagaweb.afnor.org/>
- AFCAB : Association Française de certification des armatures du béton, www.afcab.org
- CIM BETON Centre d'information sur le ciment et ses applications, www.infociments.fr
- Agence qualité construction : <http://www.qualiteconstruction.com/>
- Adhel : <http://moodle.egletons.unilim.fr/> rubrique Module / S2 / M2302 Bases du béton armé

INDEX DES ILLUSTRATIONS

Illustration 1 : schéma de ferrailage de la poutre brevetée par Joseph MONIER en 1878.....	8
Illustration 2 : exemple de réalisation en béton armé bâclée en travaux neufs, avant livraison au maître d'ouvrage....	9
Illustration 3 : mise en place d'une retombée de poutre préfabriquée de masse 3,5 tonnes.....	17
Illustration 4 : exemple d'aciers à verrous et d'aciers à empreinte.....	17
Illustration 5 : définition de l'enrobage [4.4.1].....	21
Illustration 6 : phénomène d'adhérence autour d'une armature noyée dans le béton.....	25
Illustration 7 : dispositif d'essai de la poutre en travaux pratiques.....	28
Illustration 8 : développement des fissures dans la zone tendue d'une poutre fléchie.....	30
Illustration 9 : déformation importante des matériaux en zone tendue d'une poutre fléchie	31
Illustration 10 : flambement des aciers de montage en zone comprimée d'une poutre fléchie.....	32
Illustration 11 : rupture en traction des aciers tendus en partie inférieure d'une poutre fléchie.....	32
Illustration 12 : désignations géométriques des différentes zones d'une section droite en Té sous une sollicitation de moment de flexion positive. Zone hachurée comprimée.....	34
Illustration 13 : section réelle et section de calcul à l'état limite ultime en zone de moment positif.....	38
Illustration 14 : diagrammes de déformations limites d'une section droite en zone de moment positif.....	38
Illustration 15 : espacements des armatures dans le béton.....	46
Illustration 16 : désignation géométrique des différentes zones d'une section droite en Té sous moment positif.....	50
Illustration 17 : représentation des zones comprimées et tendues d'une poutre fléchie.....	51
Illustration 18 : ruine à l'effort tranchant d'une poutre fléchie non armée transversalement.....	57
Illustration 19 : modèle de treillis de RITTER pour $\alpha = 45^\circ$ et $\alpha = 90^\circ$	59
Illustration 20 : valeur de calcul de l'effort tranchant agissant dans le cas d'un chargement réparti uniformément....	65
Illustration 21 : épure de répartition des armatures transversales.....	67
Illustration 22 : décalage de la sollicitation agissante de flexion.....	68
Illustration 23 : ferrailage complet d'une poutre fléchie, épure d'arrêt des barres, épure de répartition.....	73

INDEX DES TABLES

Tableau III.1 : Caractéristiques de résistance et de déformation du béton [Tab. 3.1].....	12
Tableau III.2 : Classe de ductilité des aciers à béton (EC2 : Annexe C).....	18
Tableau IV.1 : Classes d'exposition en fonction des conditions d'environnement (EN 206-1) [Tab 4.1].....	20
Tableau IV.2 : Classes indicatives de résistance [Tab E.1N].....	21
Tableau IV.3 : Enrobage minimal $c_{min,b}$ requis vis à vis de l'adhérence [Tab 4.2].....	22
Tableau IV.4 : Classification structurale recommandée [Tab 4.3N].....	23
Tableau IV.5 : Valeurs de l'enrobage minimal $c_{min,dur}$ requis vis-à-vis la durabilité [Tab 4.4N].....	23
Tableau V.1 : Diamètre minimal du mandrin afin d'éviter les dommages aux armatures [Tab 8.1N].....	26
Tableau VI.1 : Valeurs de μ qui définissent la zone A1, A2, B1 ou B2 de la figure page 38.....	42
Tableau X.1 : longueur d'ancrage de référence $l_{b,rqd}$ [8.4.3]	77
Tableau X.2 : Valeurs des coefficients α_1 , α_2 , α_3 , α_4 et α_5 [Tab. 8.2].....	79
Tableau X.3 : Valeur du coefficient α_6	81
Tableau X.4 : longueurs de recouvrement requises pour les fils de répartition des treillis [Tab 8.4].....	84
Tableau X.5 : Aires des sections d'aciers pour armatures Hautes Adhérence par diamètre (mm, cm ²).....	85

TABLE DES MATIÈRES

I. Liste des notations Eurocode 2.....	5
II. Le béton armé, un matériau et une technique de construction.....	8
1. Le béton armé, historique.....	8
a. Le béton des inventeurs.....	8
b. Le béton des ingénieurs.....	8
2. Le béton des constructeurs.....	9
3. Pourquoi l'acier dans le béton ?.....	9
4. Contexte réglementaire des calculs.....	10
a. Règlements antérieurs aux Eurocodes.....	10
b. Les Eurocodes.....	10
III. Les matériaux du béton armé.....	11
1. Le béton.....	11
a. Comportement expérimental du matériau béton.....	11
b. Valeur de la résistance caractéristique à la compression d'un béton [3.1.2].....	11
c. Valeur de la résistance caractéristique à la traction d'un béton [3.1.2].....	13
d. Déformations élastiques du béton [3.1.3].....	13
e. Relation contrainte déformation pour une analyse structurale non linéaire [3.1.5].....	14
f. Résistance de calcul en compression et résistance de calcul en traction [3.1.6].....	14
g. Relation contrainte déformation pour le calcul des sections [3.1.7].....	15
h. Résistance à la traction en flexion [3.1.8].....	16
2. L'acier.....	16
a. Terminologie.....	16
b. Problématique des calculs d'aire d'armature dans le cadre d'un cours de béton armé.....	16
c. Forme de la surface latérale des armatures en acier.....	17
d. Propriétés des armatures de béton armé [3.2.2].....	18
e. Hypothèses de calcul [3.2.7].....	18
IV. Durabilité et enrobage des armatures.....	19
1. généralités [4.1].....	19
2. Conditions d'environnement [4.2].....	19
3. Exigences de durabilité [4.3].....	21
4. Méthodes de vérification [4.4].....	21
a. Calcul de l'enrobage [4.4.1].....	21
b. Enrobage minimal, c_{min} [4.4.1.2].....	22
c. Enrobage minimal $C_{min,b}$ requis vis à vis de l'adhérence.....	22
d. Enrobage minimal $C_{min,dur}$ requis vis-à-vis de la durabilité.....	22
e. Prise en compte des tolérances d'exécution Δc_{dev} [4.4.1.3].....	24
V. association acier-béton.....	25
1. Adhérence acier - béton.....	25
2. Contexte réglementaire dans l' Eurocode 2.....	26
a. Ancrage des armatures longitudinales [8.3] et [8.4].....	26
b. Différents modes d'ancrage des armatures.....	27
VI. Etat limite ultime.....	28
1. Comportement expérimental d'une poutre en flexion simple.....	28
a. Matériels d'essai pour la flexion pure.....	28
b. Comportement des matériaux.....	29
2. Charge de ruine réelle et charge de calcul, coefficient de sécurité global.....	33
3. Poutre en béton armé, analyse structurale.....	33
a. Modèles structuraux pour l'analyse globale [5.3.1].....	33
b. Données géométriques [5.3.2].....	33
c. Portée utile des poutres et dalles dans les bâtiments [5.3.2.2].....	35
4. Notations utilisées, représentations graphiques, hypothèses de calcul à l'E.L.U. , réalité & modèles.....	36
a. Objectifs des calculs.....	37
b. Etat Limite Ultime, Hypothèses de calcul [6.1].....	37
c. Économie.....	40
5. Calcul de l'aire d'une section d'acier en flexion simple à l' E.L.U.....	40
a. Principe du calcul d'une section d'acier.....	40
b. Moment réduit limite μ	42
c. Démarche calculatoire de projet, organigramme général de la démarche de calcul.....	43
d. Organigramme général de la procédure de calcul des poutres à section rectangulaire.....	44
6. Calcul de la sollicitation résistante d'une section droite en flexion simple : M_{Rd}	45
a. Calcul de la sollicitation résistante d'une section droite de poutre en béton armé.....	45
7. Dispositions constructives (Eurocode 2, section 8).....	45
a. Espacement des armatures de béton armé [8.2].....	45

b.	Paquets de barres, diamètre équivalent [8.9].....	46
c.	Ancrage des paquets de barres [8.9.2].....	47
d.	Sections minimale : généralités [9.1].....	47
e.	Sections minimale et maximale d'armatures [9.2.1.1].....	47
f.	Sections minimales d'armatures [7.3.2].....	48
g.	Armatures en zone tendues sur appuis [9.2.1.2].....	48
h.	Ancrage des armatures inférieures au niveau des appuis d'extrémité [9.2.1.4].....	48
i.	Armatures de peau [9.2.4].....	49
VII.	Flexion simple à l'état limite ultime poutre en Té.....	50
1.	Rappels, Données géométriques.....	50
2.	Méthode de calcul des poutres en Té en zone de moment positif.....	52
a.	Dispositions constructives [9.2.1.1].....	54
b.	Cisaillement entre l'âme et les membrures des sections en T.....	54
c.	Organigramme général de la procédure de calcul des poutres en Té.....	55
VIII.	Poutre en béton armé soumise à un effort tranchant.....	56
1.	Introduction.....	56
a.	Comportement expérimental d'une poutre sous sollicitation de flexion et d'effort tranchant.....	57
b.	Modélisation en treillis de RITTER.....	58
2.	Contexte réglementaire.....	62
a.	Procédure générale de vérification [6.2.1].....	62
b.	Éléments pour lesquels aucune armature d'effort tranchant n'est requise [6.2.2].....	62
c.	Éléments pour lesquels des armatures d'effort tranchant sont requises [6.2.3].....	63
d.	Vérification de la contrainte de compression dans les bielles de béton.....	64
e.	Valeur de calcul de l'effort tranchant agissant VEd.....	65
f.	Répartition des armatures transversales, détermination des espacements.....	67
g.	Décalage de la courbe enveloppe des moments de flexion [9.2.1.3] (2).....	69
3.	dispositions constructives.....	69
a.	Armatures d'effort tranchant [9.2.2].....	70
b.	Démarche calculatoire de projet :.....	71
c.	Organigramme général de la procédure de calcul.....	72
IX.	Ferrailage complet d'une poutre fléchie en flexion simple.....	73
X.	ANNEXES.....	75
1.	Avantages et inconvénients du matériau Béton armé.....	75
2.	Fiche module SST 5 PPN IUT Génie civil Construction Durable.....	76
3.	Calcul des longueurs d'ancrage.....	77
a.	Contrainte ultime d'adhérence [8.4.2].....	77
b.	Longueur d'ancrage de référence [8.4.3].....	78
c.	Longueur d'ancrage de calcul [8.4.4].....	79
d.	Ancrage des armatures d'effort tranchant et autres armatures transversales [8.5].....	80
e.	Ancrage au moyen de barres soudées [8.6].....	81
f.	Recouvrements et coupleurs [8.7].....	81
g.	Recouvrements et longueur de recouvrement [8.7.2] et [8.7.3].....	82
h.	Armatures transversales dans une zone de recouvrement [8.7.4].....	83
i.	Recouvrements des treillis soudés constitués de fils à haute adhérence [8.7.5].....	84
j.	Règles supplémentaires pour les barres de gros diamètre [8.8].....	85
k.	Paquets de barres [8.9].....	85
4.	Choix des sections d'armatures, nombre de barres par lit, diamètre nominal et réel.....	86
a.	Aires des sections d'acier pour armatures Haute Adhérence...tableau à compléter.....	86
b.	Diamètre moyen.....	86
c.	Nombre de barres par lit.....	87
d.	Moment réduit limite.....	88
XI.	Applications numériques.....	89
1.	Principe de ferrailage d'une poutre (TD N°1).....	89
2.	Flexion simple à l'État Limite Ultime (TD N°2).....	90
a.	Étude de cas N°1, section droite rectangulaire.....	90
b.	Étude de cas N°2, section droite en Té.....	91
c.	Étude de cas N°3, poutre de travaux pratiques.....	93
3.	Effort tranchant.....	95
a.	Armatures d'effort tranchant au voisinage des appuis.....	95
b.	Répartition des armatures transversales.....	97

I. LISTE DES NOTATIONS EUROCODE 2

Les notations utilisées dans l' **EUROCODE 2** sont présentées dans la section 1 article [1.6]. Elles sont fondées sur la norme ISO 3898 :1987.

Majuscules latines

- **A** Action accidentelle
- **A** Aire de la section droite
- **A_c** Aire de la section droite du béton
- **A_p** Aire de la section de l'armature ou des armatures de précontrainte
- **A_s** Aire de la section des armatures de béton armé
- **A_{s,min}** Aire de la section minimale d'armatures
- **A_{sw}** Aire de la section des armatures d'effort tranchant
- **D** Diamètre du mandrin de cintrage
- **D_{Ed}** Endommagement total dû à la fatigue
- **E** Effet des actions
- **E_c, E_{c(28)}** Module d'élasticité tangent à l'origine ($\sigma_c = 0$) pour un béton de masse volumique normale à 28 jours
- **E_{c,eff}** Module d'élasticité effectif du béton
- **E_{cd}** Valeur de calcul du module d'élasticité du béton
- **E_{cm}** Module d'élasticité sécant du béton
- **E_{c(t)}** Module d'élasticité tangent à l'origine ($\sigma_c = 0$) au temps t pour un béton de masse volumique normale
- **E_p** Valeur de calcul du module d'élasticité de l'acier de précontrainte
- **E_s** Valeur de calcul du module d'élasticité de l'acier de béton armé
- **EI** Rigidité en flexion
- **EQU** Equilibre statique
- **F** Action
- **F_d** Valeur de calcul d'une action
- **F_k** Valeur caractéristique d'une action
- **G_k** Valeur caractéristique d'une action permanente
- **I** Moment d'inertie de la section de béton
- **L** Longueur
- **M** Moment fléchissant
- **M_{Ed}** Valeur de calcul du moment fléchissant agissant
- **N** Effort normal
- **N_{Ed}** Valeur de calcul de l'effort normal agissant (traction ou compression)
- **P** Force de précontrainte
- **P₀** Force initiale à l'extrémité active de l'armature de précontrainte immédiatement après la mise en tension
- **Q_k** Valeur caractéristique d'une action variable
- **Q_{fat}** Valeur caractéristique de la charge de fatigue
- **R** Résistance
- **S** Efforts et moments internes (solllicitations)
- **S** Moment statique
- **SLS** Etat-limite de service (ELS)
- **T** Moment de torsion
- **T_{Ed}** Valeur de calcul du moment de torsion agissant
- **ULS** Etat-limite ultime (ELU)
- **V** Effort tranchant
- **V_{Ed}** Valeur de calcul de l'effort tranchant agissant

Minuscules latines

- **a** Distance
- **a** Donnée géométrique
- **Δa** Tolérance pour les données géométriques
- **b** Largeur totale d'une section droite ou largeur réelle de la table d'une poutre en T ou en L
- **b_w** Largeur de l'âme des poutres en T, en I ou en L
- **c_{nom}** Enrobage nominal d'une armature
- **d** Diamètre ; Profondeur
- **d** Hauteur utile d'une section droite fléchie
- **d_g** Dimension nominale supérieure du plus gros granulats
- **e** Excentricité
- **f_c** Résistance en compression du béton
- **f_{cd}** Valeur de calcul de la résistance en compression du béton
- **f_{ck}** Résistance caractéristique en compression du béton, mesurée sur cylindre à 28 jours
- **f_{cm}** Valeur moyenne de la résistance en compression du béton, mesurée sur cylindre
- **f_{ctk}** Résistance caractéristique en traction directe du béton
- **f_{ctm}** Valeur moyenne de la résistance en traction directe du béton
- **f_p** Résistance en traction de l'acier de précontrainte
- **f_{pk}** Résistance caractéristique en traction de l'acier de précontrainte
- **$f_{p0,1}$** Limite d'élasticité conventionnelle à 0,1 % de l'acier de précontrainte
- **$f_{p0,1k}$** Valeur caractéristique de la limite d'élasticité conventionnelle à 0,1 % de l'acier de précontrainte
- **$f_{0,2k}$** Valeur caractéristique de la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % de l'acier de béton armé
- **f_t** Résistance en traction de l'acier de béton armé
- **f_{tk}** Résistance caractéristique en traction de l'acier de béton armé
- **f_y** Limite d'élasticité de l'acier de béton armé
- **f_{yd}** Limite d'élasticité de calcul de l'acier de béton armé
- **f_{yk}** Limite caractéristique d'élasticité de l'acier de béton armé
- **f_{ywd}** Limite d'élasticité de calcul des armatures d'effort tranchant
- **h** Hauteur
- **h** Hauteur totale de la section droite
- **i** Rayon de giration
- **k** Coefficient ; Facteur
- **l** (ou **l** ou **L**) Longueur ; Portée
- **m** Masse
- **n** Coefficient
- **r** Rayon
- **$1/r$** Courbure en une section donnée
- **t** Epaisseur
- **t** Instant considéré
- **t_0** Age du béton au moment du chargement
- **u** Périmètre de la section droite de béton dont l'aire est A_c
- **u,v,w** Composantes du déplacement d'un point
- **x** Profondeur de l'axe neutre
- **x,y,z** Coordonnées
- **z** Bras de levier des forces internes

Minuscules grecques

- α Angle ; Rapport
- β Angle ; Rapport ; Coefficient
- γ Coefficient partiel
- γ_A Coefficient partiel relatif aux actions accidentelles A
- γ_C Coefficient partiel relatif au béton
- γ_F Coefficient partiel relatif aux actions F
- $\gamma_{C,fat}$ Coefficient partiel relatif à la fatigue du béton
- $\gamma_{F,fat}$ Coefficient partiel relatif aux actions de fatigue
- γ_G Coefficient partiel relatif aux actions permanentes G
- γ_M Coefficient partiel relatif à une propriété d'un matériau, tenant compte des incertitudes sur la propriété elle-même, sur les imperfections géométriques et sur le modèle de calcul utilisé
- γ_P Coefficient partiel relatif aux actions associées à la précontrainte P
- γ_Q Coefficient partiel relatif aux actions variables Q
- γ_S Coefficient partiel relatif à l'acier de béton armé ou de précontrainte
- $\gamma_{S,fat}$ Coefficient partiel relatif à l'acier de béton armé ou de précontrainte sous chargement de fatigue
- γ_f Coefficient partiel relatif aux actions, compte non tenu des incertitudes de modèle
- γ_g Coefficient partiel relatif aux actions permanentes, compte non tenu des incertitudes de modèle
- γ_m Coefficient partiel relatif à une propriété d'un matériau, seules les incertitudes sur la propriété du matériau étant prises en compte
- δ Incrément / coefficient de redistribution
- ζ Coefficient de réduction / coefficient de distribution
- ϵ_c Déformation relative en compression du béton
- ϵ_{c1} Déformation relative en compression du béton au pic de contrainte f_c
- ϵ_{cu} Déformation relative ultime du béton en compression
- ϵ_u Déformation relative de l'acier de béton armé ou de précontrainte sous charge maximale
- ϵ_{uk} Valeur caractéristique de la déformation relative de l'acier de béton armé ou de précontrainte sous charge maximale
- θ Angle
- λ Coefficient d'élançement
- μ Coefficient de frottement entre les armatures de précontrainte et leurs conduits
- ν Coefficient de Poisson
- ν Coefficient de réduction de la résistance du béton fissuré en cisaillement
- ξ Rapport de la capacité d'adhérence des armatures de précontrainte à la capacité d'adhérence des armatures de béton armé
- ρ Masse volumique du béton séché en étuve, en kg/m^3
- ρ_{1000} Valeur de la perte par relaxation (en %), 1 000 heures après la mise en tension, à une température moyenne de 20°C
- ρ_l Pourcentage d'armatures longitudinales
- ρ_w Pourcentage d'armatures d'effort tranchant
- σ_c Contrainte de compression dans le béton
- σ_{cp} Contrainte de compression dans le béton due à un effort normal ou à la précontrainte
- σ_{cu} Contrainte de compression dans le béton correspondant à la déformation ultime en compression ϵ_{cu}
- τ Contrainte tangente de torsion
- ϕ Diamètre d'une barre d'armature ou d'une gaine de précontrainte
- ϕ_n Diamètre équivalent d'un paquet de barres
- $j(t, t_0)$ Coefficient de fluage, définissant le fluage entre les temps t et t_0 , par rapport à la déformation élastique à 28 jours
- $j(\infty, t_0)$ Valeur finale du coefficient de fluage
- ψ Coefficients définissant les valeurs représentatives des actions variables ψ_0 pour les valeurs de combinaison, ψ_1 pour les valeurs fréquentes et ψ_2 pour les valeurs quasi-permanentes

III. LES MATÉRIAUX DU BÉTON ARMÉ

1. Le béton

Il s'agira dans ce document de présenter les caractéristiques mécaniques du matériau béton. Il ne s'agira pas des problématiques liées à sa formulation (traitées en module MX) ou liées à l'étude de prix (déjà traitées ou qui seront traitées en module d'organisation) ni enfin des problématiques liées à la construction elle-même d'un ouvrage (module de construction ou module SST 6 ou SST 8).

a. Comportement expérimental du matériau béton

Cet aspect est traité en modules MXG3. Des essais normalisés sur éprouvettes 16 x 32 ont été réalisés en TP SST5 lors de chaque essai destructif sur pièce en béton armé (poteau et poutre).

b. Valeur de la résistance caractéristique à la compression d'un béton [3.1.2]¹

51°(P)² La résistance en compression du béton est désignée par des classes de résistance liées à la résistance caractéristique (fractile 5 %) mesurée sur cylindre f_{ck} ou sur cube $f_{ck,cube}$ conformément à l'EN 206-1 (voir cours ou TP). Les classes de résistance du présent code sont basées sur la résistance caractéristique mesurée sur cylindre, f_{ck} , déterminée à 28 jours, compatible avec une valeur maximale C_{max} . La valeur de C_{max} à utiliser dans un pays donné peut être fournie par son Annexe Nationale. En France, la valeur recommandée est C90/105.

Les résistances caractéristiques f_{ck} et les caractéristiques mécaniques correspondantes, nécessaires pour le calcul, sont données dans le Tableau 3.1³ en page 12.

variation de la résistance dans le temps [3.1.2]

Il peut être nécessaire de spécifier la résistance en compression du béton, $f_{ck}(t)$, à l'instant t , pour un certain nombre de phases (décoffrage, transfert de précontrainte par exemple), où :

$$\begin{aligned} f_{ck}(t) &= f_{cm}(t) - 8 \text{ (MPa)} && \text{pour } 3 < t < 28 \text{ jours} \\ f_{ck}(t) &= f_{ck} && \text{pour } t \geq 28 \text{ jours,} \end{aligned}$$

Il convient de fonder des valeurs plus précises sur des essais, notamment pour $t \leq 3$ jours.

La résistance en compression du béton à l'âge t dépend du type de ciment, de la température et des conditions de cure. Pour une température moyenne de 20 °C et une cure conforme à l'EN 12390, la résistance en compression du béton à différents âges t , $f_{cm}(t)$, peut être estimée à l'aide des expressions (3.1) et (3.2).

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad \dots(3.1)$$

avec

$$\beta_{cc} = \exp \left[s \left(1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right) \right] \quad \dots(3.2)$$

où :

- $f_{cm}(t)$ est la résistance moyenne en compression du béton à l'âge de t jours
- f_{cm} est la résistance moyenne en compression du béton à 28 jours, conformément au Tableau 3.1
- $\beta_{cc}(t)$ est un coefficient qui dépend de l'âge t du béton
- t est l'âge du béton, en jours
- s est un coefficient qui dépend du type de ciment :
 - = 0,20 pour les ciments de classe de résistance CEM 42,5 R, CEM 52,5 N et CEM 52,5 R (Classe R)
 - = 0,25 pour les ciments de classe de résistance CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (Classe N)
 - = 0,38 pour les ciments de classe de résistance CEM 32,5 N (Classe S)

1 [3.1.2] indique le numéro de l'article de l'Eurocode 2 dont est issue l'information ou l'expression analytique.

Le premier chiffre indique le numéro de section, ici section 3.

2 (P) signifie Principe, tel que défini en NF EN 1990 1-4

3 La numérotation choisie permet au lecteur de retrouver ce tableau dans l'Eurocode 2 avec le même numéro d'ordre, à savoir : 1^{er} tableau de la section 3 (tableau 3.1), il en sera ainsi pour chacun des tableaux de ce document numérotés ainsi.

Tableau III.1 : Caractéristiques de résistance et de déformation du béton [Tab. 3.1]

Classes de résistance du béton														Expression analytique commentaires	
	Bétons ordinaires									Bétons à Haute Résistance					
f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$ [3.1.2]
f_{ctm} [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{2/3}$ si $< C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \times \ln(1+f_{cm}/10)$ si $> C50/60$
$f_{ctk 0.05}$ [MPa]	1,1	1,3	1,5	1,8	2	2,2	2,5	2,7	2,9	3	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk 0.05} = 0,7 \times f_{ctm}$ fractile 5%
$f_{ctk 0.95}$ [MPa]	2	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6	6,3	6,6	$f_{ctk 0.95} = 1,3 \times f_{ctm}$ fractile 95%
E_{cm} [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22(f_{cm}/10)^{0.3}$ f_{cm} en MPa
ϵ_{c1} [‰]	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	Voir figure 3.2 $\epsilon_{c1} (\text{‰}) = 0,7 \times f_{cm}^{0.31} < 2,8$
ϵ_{cu1} [‰]					3,5					3,2	3	2,8	2,8	2,8	Voir figure 3.2 pour $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ $\epsilon_{cu1} (\text{‰}) = 2,8 + 27((98 - f_{cm})/100)^4$
ϵ_{c2} [‰]				2						2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	Voir figure 3.3 pour $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ $\epsilon_{c2} (\text{‰}) = 2 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0.53}$
ϵ_{cu2} [‰]					3,5					3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	Voir figure 3.3 pour $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ $\epsilon_{cu2} (\text{‰}) = 2,6 + 35((90 - f_{ck})/100)^4$
n					2					1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	Coefficient dans l'article [3.1.7] pour $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ $n = 1,4 + 23,4(90 - f_{ck})/100^4$
ϵ_{c3} [‰]					1,75					1,8	1,9	2	2,2	2,3	Voir figure 3.4 pour $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ $\epsilon_{c3} (\text{‰}) = 1,75 + 0,55((f_{ck} - 50)/40)$
ϵ_{cu3} [‰]					3,5					3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	Voir figure 3.4 pour $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ $\epsilon_{cu3} (\text{‰}) = 2,6 + 35((90 - f_{ck})/100)^4$

Remarques ou rappels:

Un Béton à Haute Résistance (B.H.R.) est un béton appartenant à une classe de résistance à la compression supérieure à C50/60 (article 3.10 de la norme NF EN 206-1).

- Norme de référence : NF EN 2016-1 et NF EN 13369
- C50/60 indique que : $f_{ck} = f_{ck,cyl} = 50 \text{ MPa}$ et $f_{ck,cube} = 60 \text{ MPa}$.
- Seule la valeur f_{ck} calculée sur éprouvettes cylindriques est prise en compte dans les calculs.
- Les valeurs caractéristiques sont inférieures aux valeurs de résistances déterminées comme des moyennes arithmétiques de résultats obtenus en essai. Le chantier doit donc viser, en moyenne, une valeur mesurée supérieure à la valeur prise en compte dans la note de calcul, appelée aussi valeur requise (+ 8 MPa [3.1.2]). Ce serait un non sens et une faute que de considérer qu'un lot performant compense la non conformité d'un autre lot.

c. Valeur de la résistance caractéristique à la traction d'un béton [3.1.2]⁴

(7)(P) La résistance en traction se rapporte à la contrainte maximale atteinte sous chargement en traction uni-axiale centrée. Pour la résistance à la traction en flexion, il convient de se reporter à [3.1.8] (1). Lorsque la résistance en traction est déterminée comme la résistance en traction par fendage $f_{ct,sp}$, il est possible de prendre, pour la résistance en traction directe f_{ct} , une valeur approchée égale à :

$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct,sp} \quad \dots (3.3)$$

L'évolution de la résistance en traction avec le temps dépend fortement des conditions de cure et de séchage ainsi que des dimensions des éléments structuraux considérés. En première approximation, on peut admettre que la résistance en traction $f_{ctm}(t)$ vaut :

$$f_{ctm}(t) = (\beta_{cc}(t))^a \cdot f_{ctm} \quad \dots (3.4)$$

où $\beta_{cc}(t)$ est donné par l'expression (3.2) et

- $a = 1$ pour $t < 28$
- $a = 2/3$ pour $t \geq 28$. Les valeurs de f_{ctm} sont données dans le Tableau 3.1

d. Déformations élastiques du béton [3.1.3]

Les déformations élastiques du béton dépendent largement de la composition de celui-ci (notamment des granulats). Il convient de considérer les valeurs données dans la présente Norme comme des valeurs indicatives, valables pour des applications générales. Il convient cependant de les déterminer de manière explicite si la structure est considérée comme sensible aux écarts éventuels par rapport à ces valeurs générales.

Le module d'élasticité du béton dépend du module d'élasticité de ses constituants. Des valeurs approchées de E_{cm} , module sécant entre $\sigma_c = 0$ et $0,4 \cdot f_{cm}$, sont données dans le Tableau 3.1 pour des bétons contenant des granulats de quartzite. Pour des granulats calcaires et des granulats issus de grès, il convient de réduire la valeur de 10 % et 30 % respectivement tandis qu'il convient de l'augmenter de 20 % pour des granulats issus de basalte.

L'évolution du module d'élasticité avec le temps peut être estimée par :

$$E_{cm}(t) = (f_{cm}(t) / f_{cm})^{0,3} \cdot E_{cm} \quad \dots (3.5)$$

expression dans laquelle $E_{cm}(t)$ et $f_{cm}(t)$ sont les valeurs à l'âge t (jours) et E_{cm} et f_{cm} les valeurs déterminées à 28 jours. La relation entre $f_{cm}(t)$ et f_{cm} est donnée par l'expression (3.1).

Le coefficient de Poisson peut être pris égal à 0,2 pour le béton non fissuré et à 0 pour le béton fissuré.

A défaut d'informations plus précises, le coefficient linéaire de dilatation thermique peut être pris égal à $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Remarque : Expérimentalement ces déformations instantanées peuvent être mises en évidence expérimentalement par un essai sur une éprouvette 16 x 32 instrumentée. Cet essai permet de déterminer la loi de comportement expérimentale du béton en compression axiale, conforme aux descriptions reprises par l'EUROCODE 2, notamment en figure 3.2 article [3.1.5]

4 La résistance à la traction en flexion est définie dans un autre article de l'EUROCODE 2, l'article [3.1.8], elle sera abordée dans le chapitre flexion simple.

e. Relation contrainte déformation pour une analyse structurale non linéaire [3.1.5]

La relation entre σ_c et ε_c pour le chargement uni-axial de courte durée, illustrée sur la Figure 3.2 (contrainte de compression et raccourcissement exprimés en valeurs absolues), est donnée par l'expression (3.14) :

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k \eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \quad \dots (3.6)$$

dans laquelle : $\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$

- ε_{c1} est la déformation au pic de contrainte, telle qu'indiquée dans le Tableau 3.1
- $k = 1,05 \cdot E_{cm} \times |\varepsilon_{c1}| / f_{cm}$ (f_{cm} selon Tableau 3.1).

L'expression (3.6) vaut pour $0 < |\varepsilon_c| < |\varepsilon_{cu1}|$ où ε_{cu1} est la valeur nominale de la déformation ultime.

D'autres relations contrainte-déformation simplifiées peuvent être appliquées, sous réserve qu'elles représentent correctement le comportement du béton considéré.

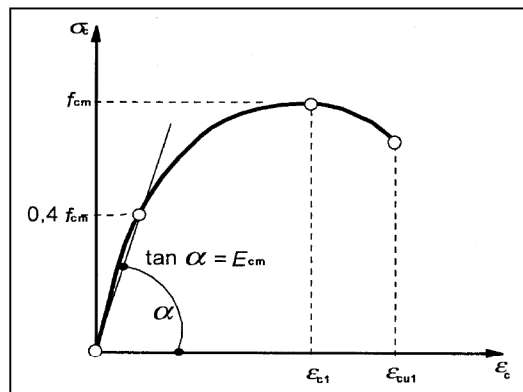


Figure 3.2 Représentation schématique de la relation contrainte-déformation pour l'analyse structurale

f. Résistance de calcul en compression et résistance de calcul en traction [3.1.6]

(1)(P) La résistance de calcul en compression est définie par l'expression

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c \quad \dots (3.7)$$

où :

- γ_c est le coefficient partiel relatif au béton, avec $\gamma_c = 1,5$
- α_{cc} est un coefficient tenant compte des effets à long terme sur la résistance en compression et des effets défavorables résultant de la manière dont la charge est appliquée.

NOTE : La valeur de α_{cc} à utiliser dans un pays donné peut être fournie par son Annexe Nationale. La valeur recommandée est $\alpha_{cc} = 1,0$.

(2)P La résistance de calcul en traction f_{ctd} est définie comme

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot f_{ctk,0,05} / \gamma_c \quad \dots (3.8)$$

où :

- α_{ct} est un coefficient tenant compte des effets à long terme sur la résistance en traction et des effets défavorables résultant de la manière dont la charge est appliquée.

NOTE : La valeur de α_{ct} à utiliser dans un pays donné peut être fournie par son Annexe Nationale. La valeur recommandée est $\alpha_{ct} = 1,0$.

g. Relation contrainte déformation pour le calcul des sections [3.1.7]

(1) Le calcul des sections peut être effectué en utilisant la relation contrainte-déformation suivante, voir Figure 3.3 (déformations en compression représentées positives) :

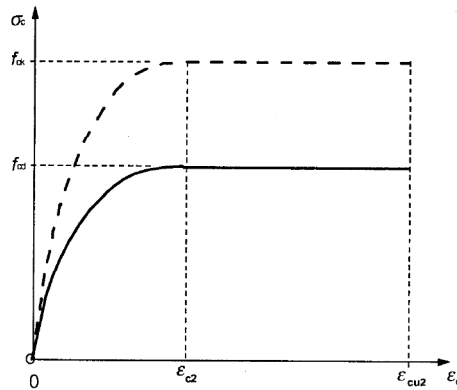
$$\sigma_c = f_{cd} [1 - (1 - \epsilon_c / \epsilon_{c2})^n] \quad \text{pour } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c2} \quad \dots(3.9)$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \text{pour } \epsilon_{c2} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu2} \quad \dots(3.10)$$

où :

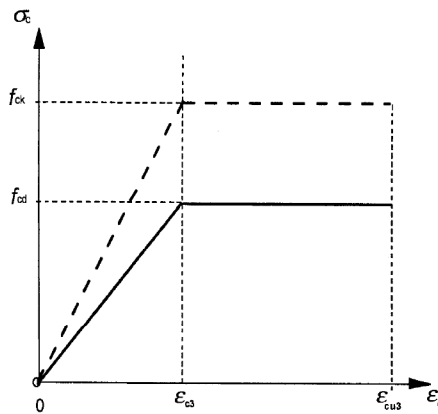
- n est l'exposant, tel qu'indiqué dans le Tableau 3.1
- ϵ_{c2} est la déformation atteinte pour la contrainte maximale, telle qu'indiquée dans le Tableau 3.1
- ϵ_{cu2} est la déformation ultime, telle qu'indiquée dans le Tableau 3.1.

Figure 3.3 Diagramme parabole-rectangle pour le béton comprimé



(2) D'autres relations contrainte-déformation simplifiées sont admises, à condition qu'elles soient équivalentes, voire plus conservatrices, que celle définie en (1) - diagramme bilinéaire de la Figure 3.4, par exemple (contrainte de compression et raccourcissement représentés en valeur absolue), avec les valeurs de ϵ_{c3} et ϵ_{cu3} telles qu'indiquées dans le Tableau 3.1.

Figure 3.4 Diagramme bilinéaire



(3) On peut admettre un diagramme rectangulaire de compression dans le béton (tel que représenté sur la Figure 3.5). Le coefficient λ , définissant la hauteur utile de la zone comprimée, et le coefficient η , définissant la résistance effective, valent :

$$\lambda = 0,8 \quad \text{pour } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad \dots(3.11)$$

$$\lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50) / 400 \quad \text{pour } 50 \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad \dots(3.12)$$

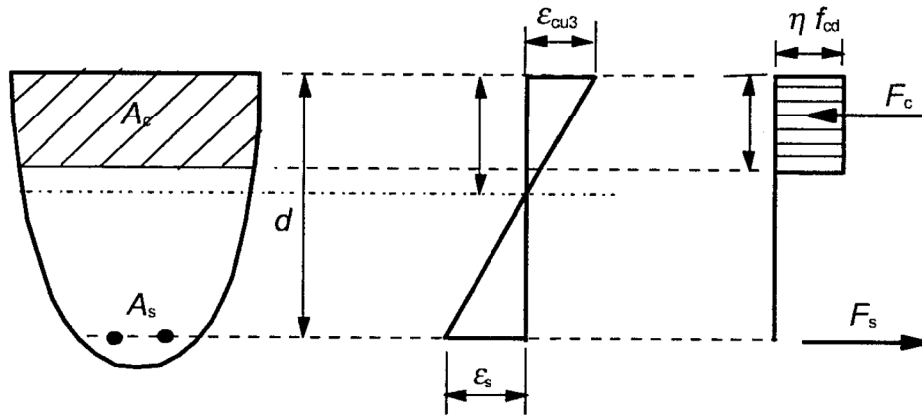
et

$$\eta = 1 \quad \text{pour } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad \dots(3.13)$$

$$\eta = 1 - (f_{ck} - 50) / 200 \quad \text{pour } 50 \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad \dots(3.14)$$

NOTE : Si la largeur de la zone comprimée diminue dans la direction de la fibre extrême la plus comprimée, il convient de réduire $\eta \cdot f_{cd}$ de 10 %.

Figure 3.5 Diagramme rectangulaire



h. Résistance à la traction en flexion [3.1.8]

La résistance moyenne à la traction en flexion des éléments en béton armé dépend de leur résistance moyenne en traction directe et de la hauteur de leur section droite. On peut appliquer la formule suivante :

$$f_{ctm,fl} = \max[(1,6-h/1000) f_{ctm} ; f_{ctm}] \quad \dots(3.15)$$

où h est la hauteur totale de l'élément en mm et f_{ctm} est la résistance moyenne en traction directe, telle qu'indiquée dans le Tableau 3.1.

La relation donnée par l'expression (3.15) s'applique également aux valeurs caractéristiques de la résistance en traction. Pour une section droite de hauteur h inférieure à 1600 mm on a donc :

$$f_{ctm,fl} = f_{ctm} \cdot$$

2. L'acier

a. Terminologie

Aciers

La norme Européenne EN 10080 « **aciers pour l'armature du béton - aciers soudables pour béton armé – Généralités** » donne la définition de ce terme : « Acier pour béton armé : produit en acier de section circulaire ou pratiquement circulaire qui est adapté pour l'armature du béton ».

Armatures

Ce terme désigne les produits obtenus à partir des aciers définis ci-dessus par des opérations de dressage, coupe, façonnage et assemblage.

b. Problématique des calculs d'aire d'armature dans le cadre d'un cours de béton armé

L'aspect calcul semble constituer **LA** problématique de l'étudiant qui découvre cet enseignement du béton armé dans les modules SST.

La réalité industrielle dégage d'autres problématiques dès lors que l'on envisage l'après calcul devant un écran d'ordinateur ou à la main. Une armature n'est pas seulement une section à calculer puis une forme à dessiner sur un plan de ferrailage. C'est surtout et finalement un produit à fabriquer et à poser dans un coffrage pour qu'il assure une fonction mécanique. Plusieurs opérations sont donc nécessaires.

- La personne qui calcule l'aire de cette section peut être un ingénieur ou un projeteur (de nombreux anciens étudiants sont ingénieurs structure ou projeteur en béton armé).
- Le dessinateur/projeteur peut être amené à définir complètement cette armature pour en faire un trait parfaitement défini sur un plan de ferrailage : une fonction, une forme, une position.
- Un chef d'équipe peut être amené à réaliser la retombée préfabriquée de cette poutre avant sa livraison sur chantier, il va façonner cette armature.... Cette retombée sera mise en œuvre.
- Un contrôleur peut vérifier dans le cadre d'un P.A.Q. la conformité de cette armature.

Finalement, en module M2302, vous devrez définir les sections d'acier et réaliser des plans de ferrailage complets.

L'outil informatique n'est cependant qu'une aide pour cette étape. Cette aide au dessin ne rend pas pour autant conforme l'armature dessinée, elle ne la rend pas plus judicieuse économiquement ni efficace mécaniquement...

Une maquette BIM de niveau exécution n'empêcherait pas non plus une non conformité de mise en œuvre, par exemple.

Illustration 3 : mise en place d'une retombée de poutre préfabriquée de masse 3,5 tonnes

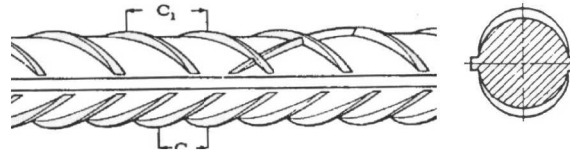


c. Forme de la surface latérale des armatures en acier

Lorsque les premières pièces en béton armé ont été réalisées, vers 1850, les seuls aciers disponibles étaient dits "doux" et de section circulaire. Leur limite d'élasticité était limitée à environ 230 MPa. L'industrie a su produire des aciers à Haute Limite d'élasticité mais surtout à Haute Adhérence. La Haute Limite d'élasticité (H.L.E.) peut être obtenue par la composition chimique (teneur en carbone), par écrouissage (ou étirage ou laminage) ou traitement thermique (trempe et revenu).

La Haute Adhérence (H.A.) est due à la création d'aspérités à la surface latérale des armatures. Les aspérités en saillie sont appelées « verrous », celles en creux sont appelées « empreintes »

Exemple d'un acier à verrous :



Exemple d'un acier à empreintes :

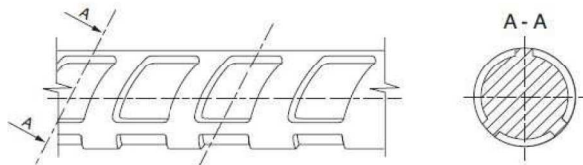
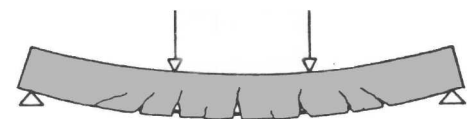


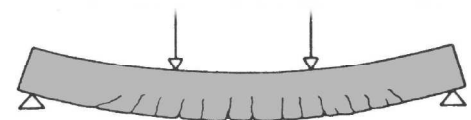
Illustration 4 : exemple d'aciers à verrous et d'aciers à empreinte

La forme de la surface latérale des aciers joue **un rôle essentiel** dans la fissuration du béton en service.

Lors d'un essai en flexion d'une poutre comportant un pourcentage moyen d'aciers doux (1% à 1,5% de la section totale de béton) on constate que sous une charge proche de la charge de service, les fissures qui résultent de l'allongement des aciers sont relativement larges (0,3 mm), peu nombreuses et situées en zone de sollicitation maximale.



Par contre, si le même essai est reproduit avec des aciers Haute Adhérence (capables d'assurer la même charge de service), on constate que les fissures sont : plus fines, 0.1 mm environ d'ouverture, deux fois plus nombreuses, réparties tout le long de la poutre.



Un grand nombre de fissures entraîne une réduction de leur ouverture, **donc** une diminution des risques de corrosion des aciers assurant une pérennité de l'ouvrage bien supérieure. La durabilité en dépend. C'est grâce aux reliefs en saillie ou en empreinte sur leur surface latérale que les barres restent solidaires de la gaine de béton et que la fissuration peut se distribuer tout le long de la poutre.

d. Propriétés des armatures de béton armé [3.2.2]

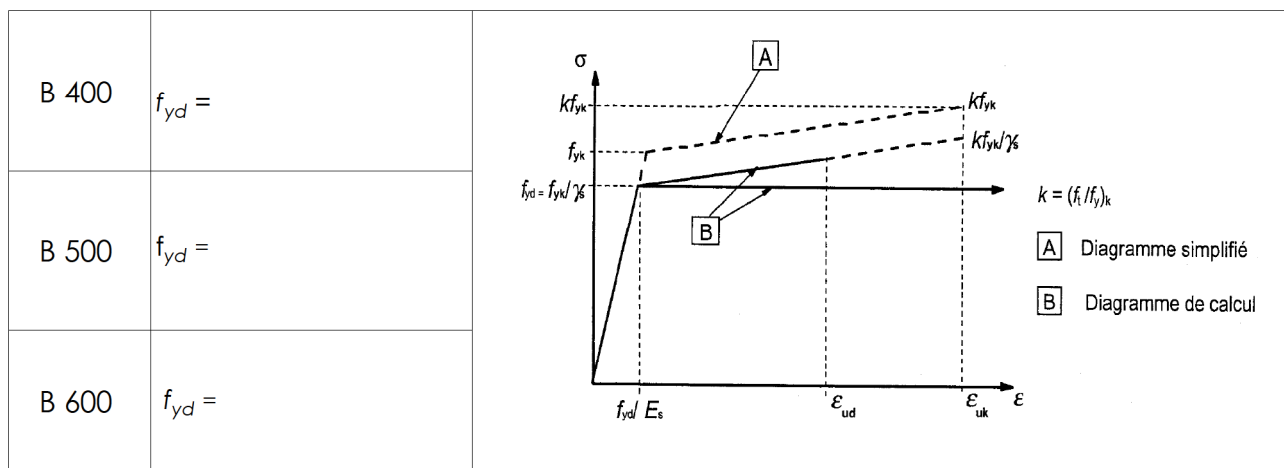
(2)(P) Le comportement des armatures de béton armé est défini par les propriétés ci-après :

- limite d'élasticité (f_{yk} ou $f_{0,2k}$), limite supérieure réelle d'élasticité ($f_{y,max}$), résistance en traction (f_t),
- ductilité (ϵ_{uk} et f_t / f_{yk}), aptitude au pliage, caractéristiques d'adhérence (voir EC2 : Annexe C),
- dimensions de la section et tolérances, résistance de fatigue, soudabilité,
- résistance au cisaillement et résistance des soudures dans le cas des treillis soudés et des poutres en treillis pré-assemblées.

e. Hypothèses de calcul [3.2.7]

Le diagramme contrainte déformation qui peut être adopté pour le calcul des sections d'acier tendues ou comprimées est le suivant.

Figure 3.8 Diagramme contrainte-déformation simplifié et diagramme de calcul pour les aciers de béton armé (tendus ou comprimés).



Pour un calcul courant, l'une ou l'autre des hypothèses suivantes peut être faite :

- $\gamma_s = 1,15$
- branche supérieure inclinée, avec une limite de déformation égale à ϵ_{ud} et une contrainte maximale $k.f_{yk} / \gamma_s$ pour ϵ_{uk} , avec $k = f_t / f_{yk}$
- branche supérieure horizontale, sans nécessité de vérifier la limite de déformation.

La valeur de ϵ_{ud} à utiliser dans un pays donné peut être fournie par son Annexe Nationale. La valeur recommandée est $\epsilon_{ud} = 0,9 \epsilon_{uk}$, donnée dans le tableau ci-dessous issu de l'Annexe C, tableau C.1

La valeur de $k = f_t / f_{yk}$ est donnée dans l'Annexe C de l'Eurocode 2 ou ci-dessous :

Tableau III.2 : Classe de ductilité des aciers à béton (EC2 : Annexe C)

Classe A ductilité normale	Classe B haute ductilité	Classe C très Haute ductilité
$\epsilon_{uk} \geq 2,5 \%$	$\epsilon_{uk} \geq 5 \%$	$\epsilon_{uk} \geq 7,5 \%$
$k \geq 1,05$	$k \geq 1,08$	$k < 1,35$

où ϵ_{uk} valeur caractéristique de la déformation relative de l'acier de béton armé ou de précontrainte sous charge maximale.

Classe A l'inclinaison est toujours dans le même sens.

Classe B l'inclinaison des nervures est contrariée sur les 2 cotés de la barre (disposition en arête de poisson)

Remarques :

- Les nuances les plus courantes désignant la valeur de la limite d'élasticité caractéristique f_{yk} ou la limite conventionnelle à 0,2% $f_{0,2k}$ sont : $f_{yk} = 400$ MPa à $f_{yk} = 600$ MPa,
- Les aciers doux S215 ou S235 ne sont pas pris en compte par l' Eurocode 2. Ces aciers peuvent être utilisés dans le cas de pliages ou des boucles de levage d'éléments préfabriqués en usine puis transportés,
- La valeur moyenne de la masse volumique de l'acier peut être supposée égale à 7850 kg/m³,
- La valeur du module d'élasticité E_s peut être supposée égale à 200 GPa,
- Le coefficient de dilatation thermique vaut $10^{-5} K^{-1}$