



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 T 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 T 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].....	16
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 T.....	50
1. Rappels, Données géométriques.....	50
2. Méthode de calcul des poutres en T 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 T.....	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 T.....	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 granulat
- **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 I 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'élancement
- 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/m³
- 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

VII. FLEXION SIMPLE À L'ÉTAT LIMITE ULTIME

POUTRE EN TÉ

1. Rappels, Données géométriques.

Dans le cas de bâtiments courants, il est fréquent que les planchers (préfabriqués ou en dalle pleine) soient portés par un réseau de poutres en béton armé. (voir TD module SST3 descente de charge).

Dans ce cas la section droite résistante de la poutre peut associer une partie du plancher, notamment en zone comprimée à mi-travée. La section droite résistante a donc une forme non pas rectangulaire mais en Té. Elle devient plus économique en acier par rapport à la section rectangulaire.

La section en Té comporte une âme verticale de largeur b_w , et une table de compression de largeur b_{eff} dont l'épaisseur est celle du plancher ou de la dalle, notée h_f .

Largeur participante des tables de compression [5.3.2.1]

Le détail complet de cette rubrique figure dans le cours de flexion simple, partie 2 "poutre en béton armé, analyse structurale" page 33.

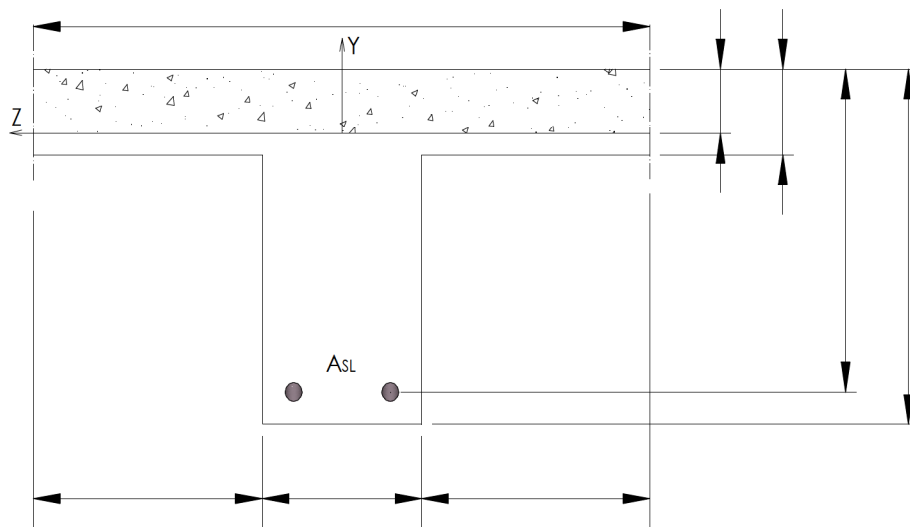


Illustration 16 : désignation géométrique des différentes zones d'une section droite en Té sous moment positif.

Terminologie :

La poutre de la figure ci-dessus est géométriquement en forme de Té. L'axe neutre qui est représenté se trouve dans l'épaisseur h_f de la dalle ou de la partie supérieure. Dans ce cas précis, la zone comprimée est de forme rectangulaire.

L'illustration ci-dessus qui représente la forme géométrique de la zone comprimée suppose implicitement que la solution constructive adoptée sur chantier est cohérente. Il faut en effet que la zone de béton comprimé existe, pour cela il faut une hauteur effective de béton comprimé compatible avec les hypothèses de calcul.

La solution constructive pour un plancher préfabriqué consiste, par exemple, à disposer des entrevous négatifs sur la zone de largeur b_{eff1} et b_{eff2} (voir fabricant de produits préfabriqués).

Intérêt :

L'intérêt de la poutre en Té réside dans l'économie d'acier procurée. La résultante des contraintes de compression est en effet située plus haut qu'une poutre de forme rectangulaire qui connaît une sollicitation agissante identique. La valeur de calcul du bras de levier des forces internes, notée z , est donc plus grande. L'expression de l'aire de la section d'acier est réduite si on considère l'expression de A_{SL} en page 43 du cours de flexion, ou dans l'organigramme de flexion simple. L'intérêt économique réside donc dans la diminution de la quantité du matériau qui coûte le plus cher dans une structure en béton armé : l'acier.

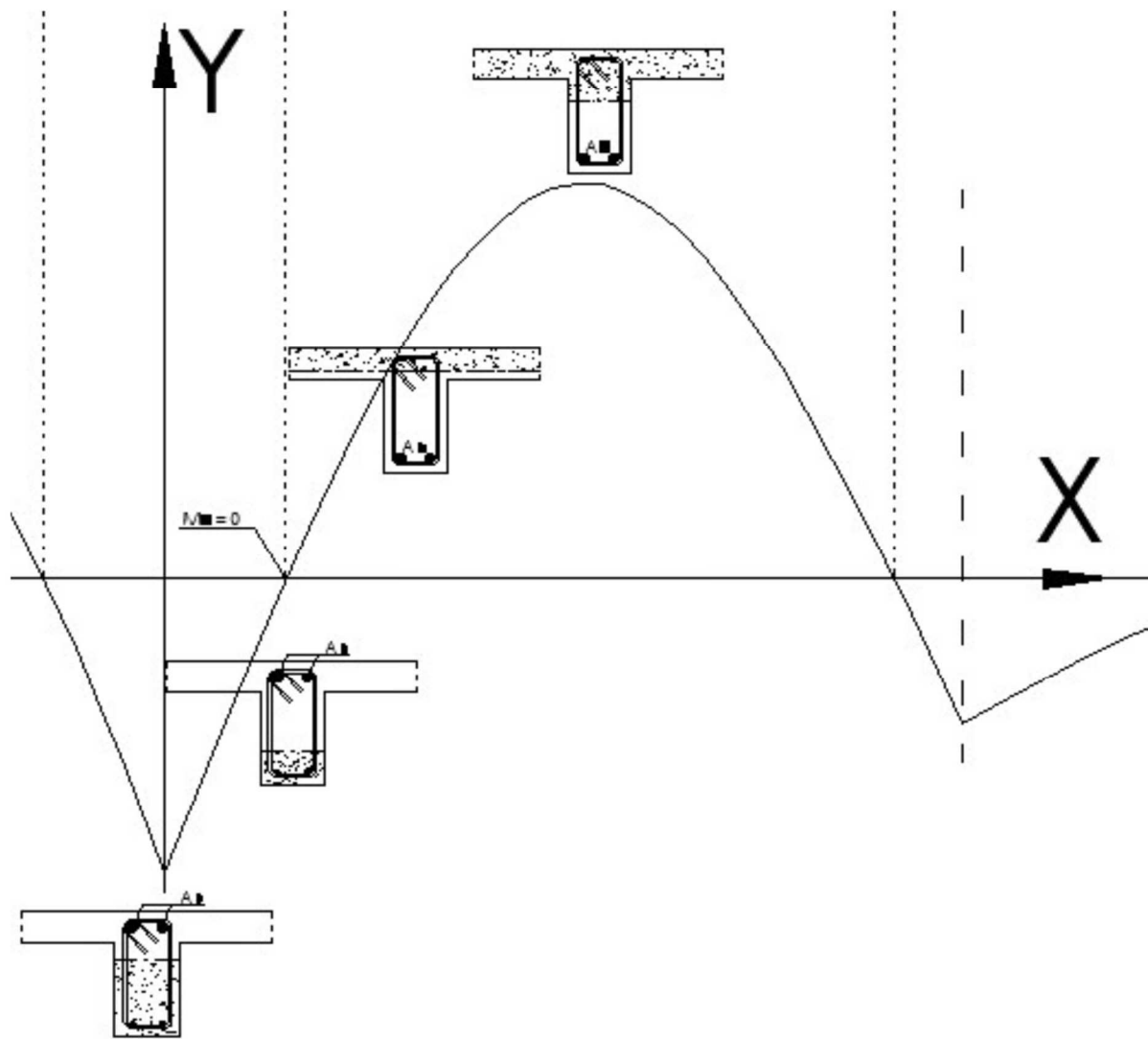


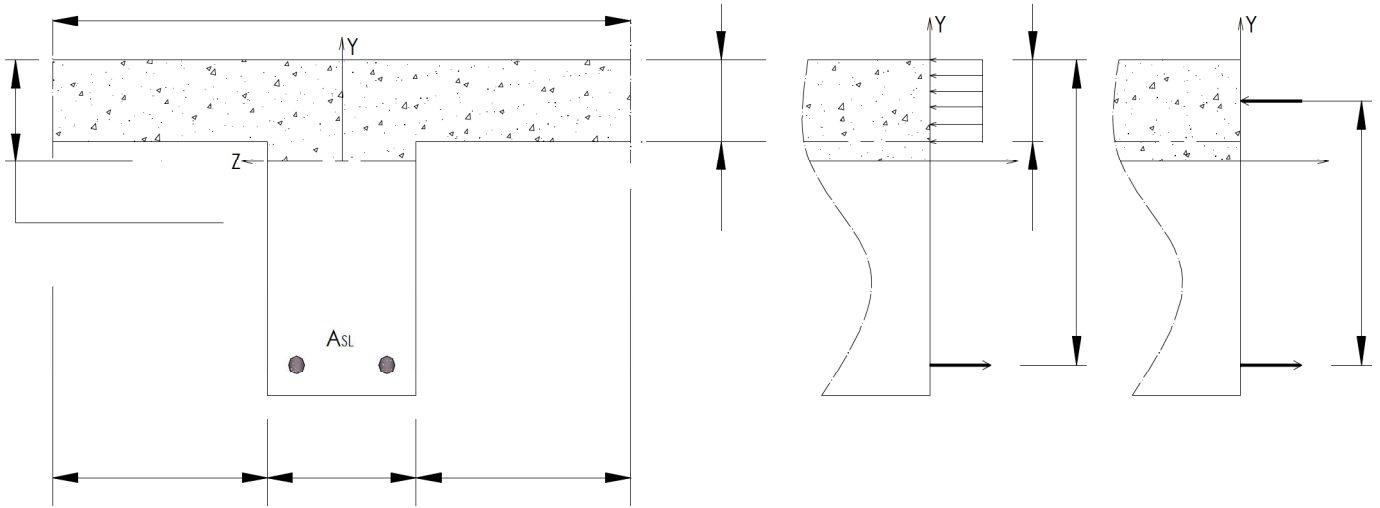
Illustration 17 : représentation des zones comprimées et tendues d'une poutre fléchie.

Sur la zone de moments **négatifs** la zone comprimée est de forme rectangulaire et e largeur b_w : l'aire de la section d'acier se trouve en zone tendue de la poutre, "en haut", et se calcule avec la procédure déjà vue dans le chapitre flexion simple, voir organigramme flexion simple E.L.U. Page 43

Sur la zone de moments **positifs** la zone comprimée peut être de forme rectangulaire si le moment est inférieur à M_T ou en forme de "Té" si le moment de flexion est supérieur à M_T . (la valeur de calcul de M_T est déterminée ci-après).

2. Méthode de calcul des poutres en T en zone de moment positif

Position limite de l'axe neutre



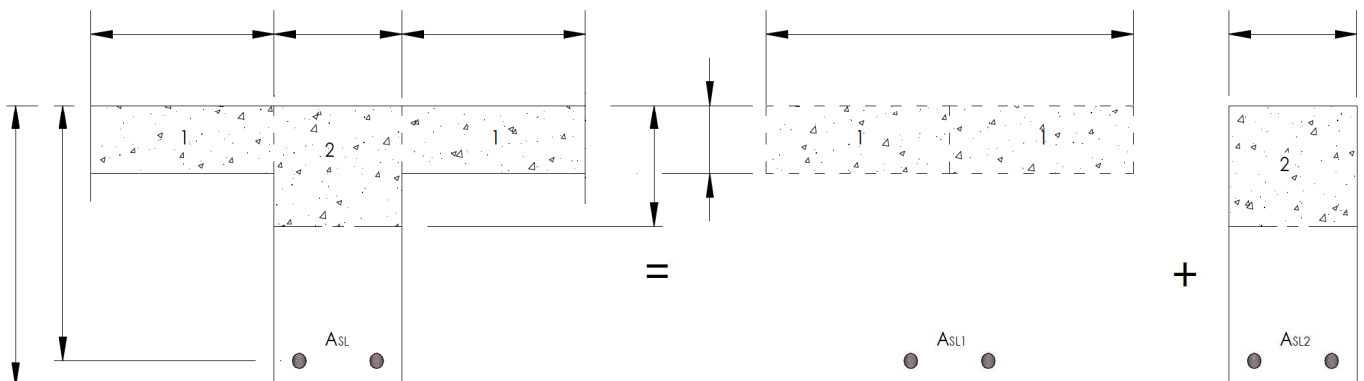
La représentation simplifiée du diagramme contrainte déformation du béton comprimé est un rectangle, voir article et figure 3.5 en page 16. Lorsque l'axe neutre est à une distance égale à $1,25 \cdot h_f$ de la fibre la plus comprimée, ce diagramme rectangulaire présente une hauteur égale à h_f . La table de compression est alors entièrement comprimée. Il est possible de calculer le moment de flexion équilibré par cette seule table de compression entièrement comprimée, il sera noté M_T .

$$M_T = F_c \cdot z \quad \text{avec} \quad \begin{cases} F_c = b_{\text{eff}} \cdot h_f \cdot f_{cd} \\ z = d - h_f/2 \end{cases} \quad M_T =$$

Il faut comparer la valeur de calcul du moment agissant M_{Ed} et M_T , deux cas sont alors envisagés :

$M_{Ed} \leq M_T$ alors l'axe neutre est dans la table de compression, la section droite en T est calculée comme **une poutre rectangulaire** de zone comprimée de largeur b_{eff} . La procédure de calcul est celle de l'organigramme de synthèse fourni dans le polycopié de flexion simple à l'E.L.U. (voir page 43 du cours de flexion simple).

$M_{Ed} > M_T$ alors l'axe neutre est dans la nervure de largeur b_w et zone comprimée n'est plus rectangulaire mais **en T**. Le principe consiste à décomposer la section comprimée en T en deux zones rectangulaires comme indiqué ci-dessous.



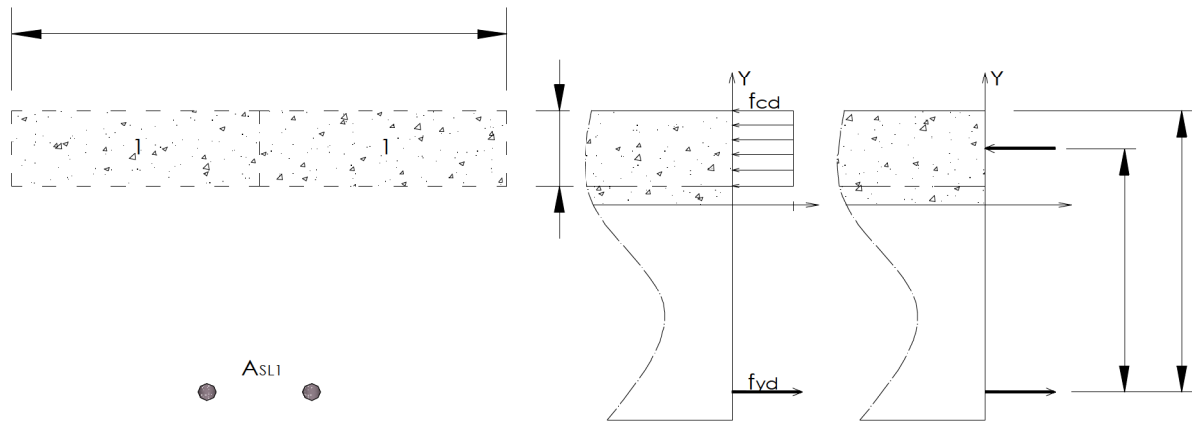
La zone comprimée "1" représente les ailes de la table de compression, sa largeur est $b_{eff1} + b_{eff2}$

La zone comprimée "2" représente la partie comprimée de l'âme de la poutre.

Le moment équilibré par la zone "1" est noté M_{E1} :

M_{E1} est une fraction de M_T : $M_{E1} = M_T \cdot (b_{eff} - b_w) / b_{eff}$. Il permet le calcul d'une aire A_{SL1} d'acier

L'étude de la zone "1" est plus simple que celle d'une poutre rectangulaire. En effet la hauteur comprimée de calcul (voir figure 3,5) est déjà connue puisque égale à h_f . L'aire de la section d'acier A_{SL1} permet d'équilibrer le moment M_{E1} .

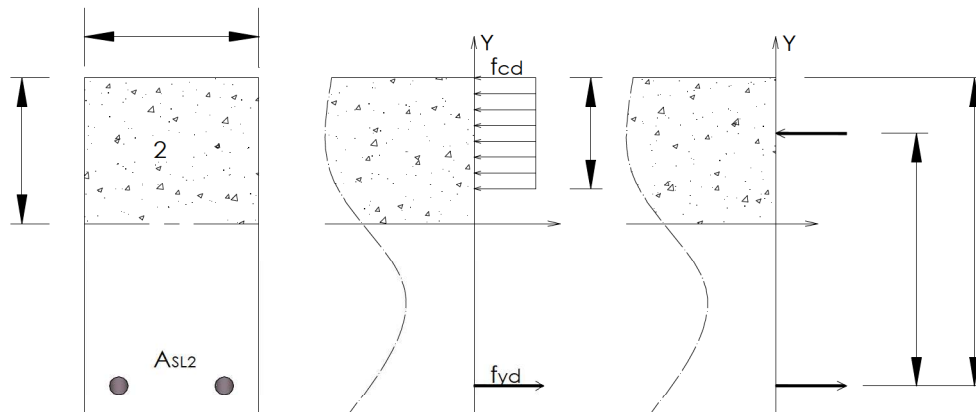


L'équation d'équilibre de la section s'écrit : $F_{C1} = F_{S1}$ et $M_{E1} = z_1 \cdot F_{C1}$

Avec $F_{S1} = A_{SL1} \cdot f_{yd}$ et $z_1 = d - h_f/2$, il vient :

$$A_{SL1} = M$$

Le moment équilibré par la zone "2" est noté M_{E2} : $M_{E2} = M_{Ed} - M_{E1}$



La démarche calculatoire est identique à celle exposée dans le chapitre flexion simple à l'E.L.U.

Il s'agit de déterminer l'aire de la section d'acier A_{SL2} qui permet d'équilibrer le moment de flexion qui n'est pas équilibré par la zone "1" définie ci-avant.

$$\begin{cases} \mu = \frac{M_{E2}}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \\ \alpha = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2\mu}) \\ z_2 = d(1 - 0,4 \cdot \alpha) \end{cases} \Rightarrow A_{SL2} = \frac{M_{E2}}{z_2 \cdot f_{yd}}$$

L'aire totale d'armature à disposer dans la zone tendue de la poutre ne Té est $A_{SL} = A_{SL1} + A_{SL2}$

$$A_{sL} = M$$

a. Dispositions constructives [9.2.1.1]

Les dispositions constructives à mettre en œuvre sont identiques à celles déjà présentées en page
Erreur : source de la référence non trouvée et 46.

b. Cisaillement entre l'âme et les membrures des sections en T

En démarche de projet il conviendra de vérifier la jonction âme-membrure de la poutre en T.
L' Eurocode 2 justifie ce point là en article **[6.2.4]**

c. Organigramme général de la procédure de calcul des poutres en Té.

