

Table des matières

Chapitre Premier : Construction mixte	15
1 Hypothèses et généralités	15
1.1 Avantages et inconvénients	15
1.2 Applications courantes.	20
1.3 Hypothèses générales.	22
2 Calcul de section critique	27
2.1 Largeur participante de dalle.	27
2.2 Calcul plastique de section critique.	31
2.3 Calcul élastique de section critique.	40
2.4 Calcul de la connexion.	50
3 Vérification d'une section mixte	58
3.1 Combinaisons d'actions	58
3.2 Vérification de la poutre aux ELU.	60
3.3 Vérification aux ELS	68
4 Applications	71
Application 1 : calcul d'une section mixte	71
Application 2 : Vérification d'une poutre mixte	81
Application 3 : Connexion d'une poutre mixte	96
5 Annexes	100
5.1 Caractéristiques des profilés	100
5.2 Chargements et réactions d'appuis sur une poutre hyperstatique	100
Second Chapitre : béton précontraint	101
1 Introduction	101
1.1 Intérêt de la précontrainte	101
1.2 Principales méthodes de précontrainte	106
2 Base des dispositions réglementaires	109
2.1 Etats limites de service (ELS)	109

6	Conception de structures mixtes et précontraintes	
2.2	Etats limites Ultimes (ELU)	111
3	Dimensionnement des structures isostatiques	116
3.1	Notations	116
3.2	Respect des contraintes limites	118
3.3	Relations de dimensionnement	123
4	Les pertes de précontraintes	129
4.1	Pertes instantanées	129
4.2	Pertes différées	135
5	Justification d'une structure précontrainte	139
5.1	Sections à prendre en compte	139
5.2	Calcul de l'enrobage	139
5.3	Justification des contraintes dans la section à l'ELS	140
6	Prédimensionnement en béton précontraint	145
6.1	Détermination du chargement	145
6.2	Détermination de la force de précontrainte	145
6.3	Choix des câbles	146
6.4	Tracé du câble	146
6.5	Effort tranchant	147
6.6	Organigramme des vérifications de prédimensionnement	148
6.7	Tableau de vérification de l'ouvrage au cours de sa vie	150
7	Applications	152
7.1	Application 1 : Dimensionnement d'une section mixte	152
7.2	Application 2 : calcul des pertes instantanées	158
7.3	Application 3 : calcul des pertes différées	164
8	Projet : prédimensionnement complet d'un élément en béton précontraint	168
9	Annexes	188
9.1	Dispositions des gaines de précontraintes	188
9.2	Dispositions d'ancrages	188

Table des figures

Figure 1 : schéma des poutres de l'étude	15
Figure 2 : schéma des contraintes	17
Figure 3 : répartition des contraintes dans une section quelconque	18
Figure 4 : schéma de principe de répartition des contraintes dans une section mixte	19
Figure 5 : Goolwa Bridge	20
Figure 6 : la poutre métallique n'est pas nécessairement un profilé mais peut-être, comme ici, une poutre treillis	20
Figure 7 : ouvrage mixte pour lequel un grand nombre de poutres de faibles dimensions ont été mises en place	21
Figure 8 : vue inférieure d'une dalle mixte coulée sur une tôle nervurée	21
Figure 9 : vue d'une structure mixte, Thrivent Financial Building	22
Figure 10 : modèle parabole rectangle du béton	23
Figure 11 : modèle élastique linéaire	24
Figure 12 : modèle bilinéaire élasto-plastique	24
Figure 13 : caractérisation géométrique de la section	26
Figure 14 : vue en coupe d'une section mixte présentant la largeur de dalle participante	28
Figure 15 : vue longitudinale d'une poutre avec une travée de rive (1), un appui central (2), une travée autre que de rive (3) et une console (4)	28
Figure 16 : vue en long de la poutre cas 1	29
Figure 17 : vue en coupe de la poutre cas 1	29
Figure 18 : vue en long de la poutre cas 2	30
Figure 19 : vue en coupe de la poutre cas 2	30
Figure 20 : position de l'axe neutre supposé	32
Figure 21 : contraintes plastiques sous moment positif avec l'axe neutre dans la dalle	33
Figure 22 : contraintes et forces équivalentes lorsque l'AN se trouve dans la dalle	34
Figure 23 : contraintes plastiques sous moment positif avec l'axe neutre dans le profilé	35
Figure 24 : astuce de résolution pour le calcul de la position de l'axe neutre lorsque celui-ci se trouve dans le profilé	35
Figure 25 : contraintes et forces équivalentes pour un axe neutre se trouvant dans le profilé sous moment positif	37
Figure 26 : position du centre de gravité de la partie comprimée du profilé	38
Figure 27 : contraintes plastiques sous moment négatif	39
Figure 28 : astuce pour le calcul de l'AN dans le cas d'un moment négatif	39
Figure 29 : schéma de principe des contraintes élastiques sous moment positif avec l'axe neutre dans la dalle	41
Figure 30 : signe du moment statique en fonction de la position par rapport à l'axe neutre	42
Figure 31 : contraintes élastiques sous moment positif avec l'axe neutre dans le profilé	44
Figure 32 : signe du moment statique en fonction de l'abscisse z	45
Figure 33 : position de l'AN pour déterminer l'élément dans lequel il se trouve	46

Figure 34 : contraintes élastiques sous moment négatif	48
Figure 35 : effort transmis à l'interface sous moment positif	51
Figure 36 : effort transmis à l'interface sous moment négatif	51
Figure 37 : découpage de la poutre mixte en section pour le calcul de l'effort plastique d'interface	52
Figure 38 : équilibre d'un tronçon de rive	52
Figure 39 : équilibre d'un tronçon central	53
Figure 40 : découpage de la poutre mixte en section pour le calcul de l'effort élastique d'interface	54
Figure 41 : schéma goujon	55
Figure 42 : coupe d'une poutre avec plaque nervurée parallèle à la poutre	56
Figure 43 : coupe d'une poutre avec plaque nervurée parallèle à la poutre	57
Figure 44 : caractérisation de c	63
Figure 45 : cadre en U inversé	65
Figure 46 : organigramme de vérification d'une section mixte	67
Figure 47 : flèches réglementaires	68
Figure 48 : poutre isostatique	69
Figure 49 : cas d'un axe neutre dans la dalle	73
Figure 50 : cas d'un axe neutre dans le profilé	73
Figure 51 : contraintes et forces équivalentes lorsque l'AN se trouve dans la dalle	74
Figure 52 : axe neutre dans le profilé avec section sur appui	75
Figure 53 : si l'axe neutre se trouve dans le profilé	77
Figure 54 : si l'axe neutre se trouve dans le vide entre la dalle et le profilé	77
Figure 55 : cas AN dans le profilé sur appui	80
Figure 56 : découpage en section pour le calcul de b_{eff}	87
Figure 57 : contraintes et forces équivalentes lorsque l'AN se trouve dans la dalle	88
Figure 58 : position de la zone comprimée	90
Figure 59 : cadre en U inversé	92
Figure 60 : schéma du découpage pour le calcul de la connexion	97
Figure 61 : schéma goujon	98
Figure 62 : annexe chargements sur poutre hyperstatique	100
Figure 63 : schématisation d'un effort de précontrainte excentré	104
Figure 64 : schématisation des contraintes pour un effort excentré	105
Figure 65 : pont construit en encorbellement en béton précontraint	108
Figure 66 : pont en béton précontraint en milieu humide	108
Figure 67 : actions exercées par le câble sur le béton	112
Figure 68 : schématisation de la poutre	114
Figure 69 : Schématisation de la poutre précontrainte selon la méthode directe	114
Figure 70 : schématisation et notation de la section	116
Figure 71 : schématisation de l'état de contrainte sous moment maximum ou minimum	118
Figure 72 : schématisation d'un fuseau	122
Figure 73 : section sous-critique	126
Figure 74 : effet de la précontrainte sur appui	141
Figure 75 : fissuration inversée de la poutre	144
Figure 76 : organigramme de vérification	149
Figure 77 : tableau de vérification	151
Figure 78 : variation de la perte de précontrainte en fonction de l'abscisse	159
Figure 79 : comparaison graphique de la précontrainte avant et après le recul d'ancrage	161
Figure 80 : coupe de la section	168

Figure 81 : vue en long	169
Figure 82 : espacements minimums des gaines	173
Figure 83 : disposition des gaines	173
Figure 84 : schéma de disposition des câbles de précontraintes	175
Figure 85 : disposition des ancrages en bout de poutre	177
Figure 86 : schématisation du tracé des câbles dans l'élément	178
Figure 87 : disposition des gaines	188
Figure 88 : disposition des ancrages en bout de poutre	189

Chapitre Premier : Construction mixte

1 Hypothèses et généralités

La construction mixte est la réalisation d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages en associant un matériau possédant de bonnes caractéristiques en traction (généralement des poutrelles en acier) avec du béton. L'idée de la construction mixte provient d'une réflexion sur l'optimisation des matériaux dans notre élément de structure. En effet, les porteurs horizontaux, généralement soumis à de la flexion simple, subissent des contraintes de traction en fibre inférieure et des contraintes de compression en fibre supérieure. Le béton possédant une très mauvaise résistance à la traction, il a donc été nécessaire de l'associer avec d'autres matériaux afin de lui permettre de fonctionner en flexion. Ces réflexions ont mené aux matériaux couramment utilisés aujourd'hui : le béton armé, le béton précontraint et la construction mixte.

1.1 Avantages et inconvénients

Pour pouvoir assurer le fonctionnement de notre section mixte, la connexion entre le béton et l'acier doit être totale. Il ne doit y avoir aucun glissement entre nos deux matériaux. Pour pouvoir mieux appréhender l'importance de cette connexion sans pour autant se lancer dans des calculs longs et complexes, voici un exercice d'application simple.

Application

Calculer la flèche ainsi que les contraintes dans les deux éléments suivants et comparer les résultats :

- Cas 1 : deux poutres superposées de largeur b , de hauteur h et de longueur L
- Cas 2 : une unique poutre de largeur b , de hauteur $2 \cdot h$ et de longueur L

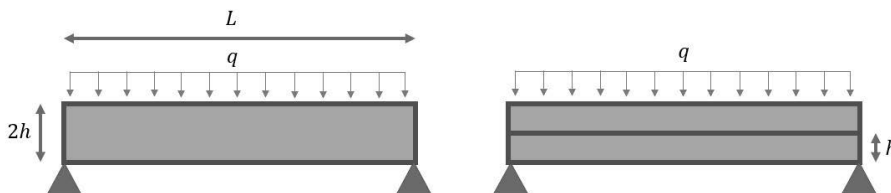


Figure 1 : schéma des poutres de l'étude

Les poutres des cas 1 et 2 sont composées des mêmes matériaux et le chargement est dans les deux cas un chargement réparti uniforme de charge linéique q .

Correction

1) Calcul des moments sollicitants dans les éléments

Cas 1 :

La charge répartie est reprise de manière uniforme et identique dans les deux poutres. Chaque poutre subit donc une charge répartie d'intensité $\frac{q}{2}$. On en déduit donc le moment sollicitant $M_{ED,1}$.

$$M_{ED,1} = \frac{qL^2}{16}$$

Cas 2 :

La charge répartie est ici uniquement reprise par un élément. Le moment sollicitant $M_{ED,1}$ est donc égale à :

$$M_{ED,2} = \frac{qL^2}{8}$$

2) Calcul des contraintes

Les contraintes, dans un élément en flexion simple, se calculent avec la formule suivante :

$$\sigma(y) = \frac{My}{I}$$

Cette contrainte est exprimée en fonction de y , la distance entre le point de calcul considéré et l'axe neutre de notre élément. Pour rappel, l'axe neutre est l'axe sur lequel aucune contrainte ne s'exerce dans notre section (il sera généralement au centre de la section).

Les contraintes maximales dans nos sections se trouvent aux fibres extrêmes (supérieures et inférieures). Comme notre section est symétrique, les contraintes supérieures et inférieures sont égales en valeur absolue. On obtient donc, dans nos deux cas :

$$\sigma_1 = \frac{M_{ED,1}h}{2I_1}$$

$$\sigma_2 = \frac{M_{ED,2}h}{I_2}$$

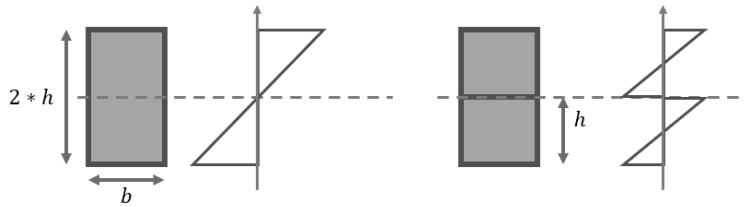


Figure 2 : schéma des contraintes

3) Calcul de la flèche

La flèche d'une poutre soumise à un chargement uniformément réparti est connue et a pour expression :

$$f = \frac{5qL^4}{384EI}$$

Soit f_1 la flèche du cas 1 et f_2 la flèche du cas 2 :

$$f_1 = \frac{5qL^4}{768EI_1}$$

$$f_2 = \frac{5qL^4}{384EI_2}$$

4) Calcul des inerties

Afin de pouvoir comparer les contraintes et les flèches dans nos deux cas, il est nécessaire de calculer les inerties de nos éléments. Pour rappel, l'inertie d'une section rectangulaire de largeur b et de hauteur h se calcule comme :

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

Les inerties ont donc pour valeur :

$$I_1 = \frac{bh^3}{12}$$

$$I_2 = \frac{b(2h)^3}{12} = \frac{2bh^3}{3}$$

5) Calcul des rapports de contraintes et de flèches

On calcule tout d'abord les rapports de moment et d'inertie.

$$\frac{I_2}{I_1} = 8$$

$$\frac{M_{ED,2}}{M_{ED,1}} = 2$$

Le rapport des contraintes s'exprime comme :

$$R_\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{2I_1 M_{ED,2}}{I_2 M_{ED,1}} = 2 * \frac{1}{8} * 2 = \frac{1}{2}$$

Le rapport des flèches s'exprime alors comme :

$$R_f = \frac{f_2}{f_1} = 2 * \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{4}$$

On constate donc que la connexion, qui empêche tout glissement entre notre élément supérieur et notre élément inférieur, permet de réduire les contraintes de moitié et de diviser la flèche totale par quatre.

La construction mixte permet donc une optimisation des matériaux en permettant à chacun de travailler dans son domaine de fonctionnement optimum.

Le béton est connu pour sa faiblesse en traction, mais son comportement en compression et son faible coût en font un matériau très usité dans nos constructions. L'acier possède un comportement isotrope ainsi qu'une excellente résistance à la rupture, généralement caractérisée par sa limite d'élasticité, mais ses excellentes performances ainsi que son coût élevé rendent les éléments de construction métalliques fins et élancés. Cet élancement important génère l'apparition d'instabilités comme le flambement et le voilement en compression ou le déversement en flexion simple.

Pour une sollicitation en flexion simple, qui représente le type de chargement le plus courant pour des porteurs horizontaux en génie civil, les contraintes se répartissent de la manière suivante dans une section quelconque. Les fibres supérieures ainsi que tout point au-dessus de l'axe neutre sont soumis à de la compression, alors que l'ensemble des points situés sous l'axe neutre subissent des contraintes de traction.

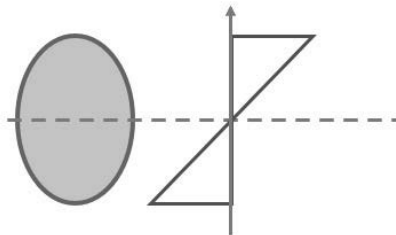


Figure 3 : répartition des contraintes dans une section quelconque

Notre élément mixte est généralement composé d'un profilé métallique sur lequel une dalle de compression en béton est coulée. Pour un élément bien dimensionné, l'axe neutre se trouvera aux environs de la limite entre le béton et le profilé. La dalle béton sera alors comprimée alors que le profilé métallique sera lui tendu. On observe alors ici l'intérêt de la section mixte qui permet à chaque matériau de travailler dans son domaine de fonctionnement optimal.

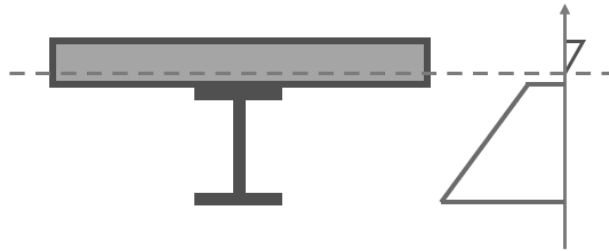


Figure 4 : schéma de principe de répartition des contraintes dans une section mixte

Cependant, pour une poutre sur plusieurs appuis, le moment fléchissant est négatif sur appuis et les contraintes sont donc inversées dans la section. Le béton travaille alors en traction et une partie du profilé se comprime. Il est donc nécessaire d'ajouter des armatures longitudinales dans la dalle béton afin de reprendre les efforts de traction subis par la dalle béton.

En plus de ses bonnes performances mécaniques, les ouvrages mixtes présentent l'avantage d'être rapides à construire notamment grâce à la préfabrication des profilés en usine. Cette préfabrication peut néanmoins devenir un inconvénient notamment lorsque ceux-ci sont de grandes dimensions ce qui rend leur transport particulièrement difficile. Un des principaux critères de la viabilité d'un pont mixte sera la capacité de l'entreprise à pouvoir transporter les éléments sur le chantier. On retrouve par exemple des ouvrages mixtes sur un grand nombre de LGV en France, car le terrassement préalable de la ligne à la construction des ouvrages de franchissement permet de dégager une route d'accès rectiligne et large permettant de transporter les profilés aisément.

Construction mixte	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Optimisation des matériaux : le béton travaille en compression et l'acier en traction • Rapidité d'exécution • Facilité de coulage de la dalle avec un bac en acier collaborant • Légèreté structurelle • Grands espaces modulables permis par les portées importantes des éléments mixtes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Comportement inverse sur appui • Comportement au feu (sensibilité des profilés aciers aux élévations de température importantes)

1.2 Applications courantes

La construction mixte acier-béton s'est démocratisée dans deux usages principaux : les ouvrages d'art et les immeubles de bureau. Voici quelques exemples courants de structures réalisés à l'aide de cette technologie.

1.2.1 Exemples de ponts

Il existe des nombreux exemples de ponts conçus en construction mixte. La solution mixte permet d'obtenir des portées importantes qui sont compétitives pour des ouvrages de 40 à 120 m. Cette portée optimale correspond aussi à celle des ouvrages en béton précontraint. Ces deux technologies de construction ont donc une gamme d'utilisation assez similaire.



Figure 5 : Goolwa Bridge, photo de Denisbin



Figure 6 : la poutre métallique n'est pas nécessairement un profilé mais peut-être, comme ici, une poutre treillis, photo de Alan Levine



Figure 7 : ouvrage mixte pour lequel un grand nombre de poutres de faibles dimensions ont été mises en place, photo de Christophers Sessums

Pour des franchissements de faible portée, il est possible d'utiliser des tabliers mixtes à poutrelles enrobées. Ici, les poutrelles ne sont plus sous la dalle mais sont situées dans la dalle en béton. Cette disposition, bien que moins efficace, permet d'avoir des ouvrages de faibles épaisseurs tout en étant plus performants qu'un simple ouvrage en béton armé.

1.2.2 Exemple en bâtiment

Les dalles mixtes sont particulièrement utilisées pour les bâtiments dans lesquels de grands espaces libres de tout poteau sont nécessaires. On les retrouve généralement dans les tours ou immeubles de bureaux, les centres commerciaux, les parkings ou encore les bâtiments anciens après réhabilitation.



Figure 8 : vue inférieure d'une dalle mixte coulée sur une tôle nervurée. Photo de Orest Ukrainsky



Figure 9 : vue d'une structure mixte, Thrivent Financial Building, Photo de City of Minneapolis Archives

1.3 Hypothèses générales

Afin de pouvoir procéder à la caractérisation des sections ainsi qu'à la mise en place de l'ensemble des calculs qui permettront de dimensionner et de vérifier nos éléments, il est nécessaire de définir les hypothèses et les conventions que nous utiliserons. En effet, la validité de l'ensemble des calculs effectués est restreinte à notre champ d'hypothèses.

1.3.1 Hypothèse d'adhérence parfaite entre le béton et l'acier

L'intégralité des calculs de sections critiques qui vont être présentés ici supposent une adhérence parfaite entre le béton et le profilé métallique. Cette adhérence permet la bonne diffusion des contraintes entre les deux matériaux et est essentielle pour assurer le bon fonctionnement d'une structure mixte.

Dans la majorité des cas, cette adhérence est assurée par des connecteurs métalliques (goujons) dont le nombre et l'espacement sont calculés en s'assurant de la bonne transmission des efforts à la limite entre nos deux matériaux.

1.3.2 Hypothèses sur les matériaux

Afin de pouvoir étudier un élément mixte, il est nécessaire de poser les bases de notre problème notamment en définissant avec précision les matériaux utilisés ainsi que les chargements appliqués à notre élément.

Notre étude des sections mixtes se fait selon l'Eurocode et utilise donc les paramètres matériaux définis par celui-ci. Nous utiliserons les notions de ce dernier ainsi que ses coefficients matériaux. Il est nécessaire de différencier les aciers de structure (indice a),

les aciers d'armature (indice s), les aciers pour les connecteurs (indice v) et le béton de structure (indice c).

1.3.2.1 Caractéristiques du béton de structure

Pour caractériser notre béton de structure, les propriétés suivantes doivent être connues :

- Valeur caractéristique de la résistance en compression (obtenue par des essais à 28 jours sur des éprouvettes normalisées cylindriques ou rectangulaires) : f_{ck}

Exemple : pour un béton C40/45, $f_{ck} = 40\text{MPa}$

- Résistance à la traction moyenne : f_{ctm}

$$f_{ctm} = 0.3 * (f_{ck})^{\frac{2}{3}}$$

- Module sécant E_{cm} (GPa)

$$E_{cm} \text{ (GPa)} = 22 * \left[\frac{f_{ck} \text{ (en MPa)} + 8}{10} \right]^{0.3}$$

- Module effectif $E_{c,eff}$: ce module effectif tient compte de l'effet du fluage. Il se calcule généralement comme :

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{2}$$

- En plasticité, on considère que le béton possède un modèle parabole rectangle équivalent

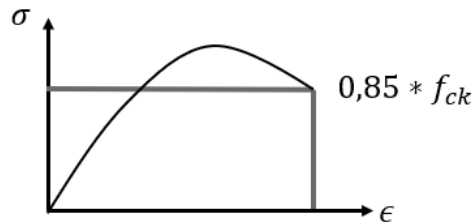


Figure 10 : modèle parabole rectangle du béton

- En élasticité, on considère que le béton possède un modèle élastique linéaire de pente $E_{c,eff}$