

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 $2*h$ et de longueur L

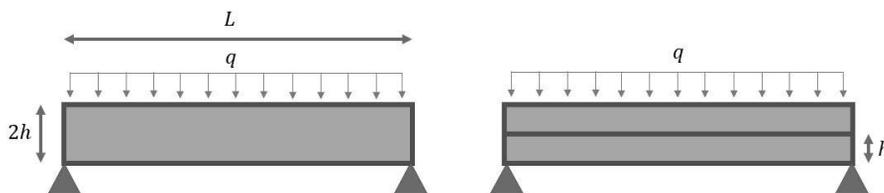


Figure 1 : schéma des poutres de l'étude

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 :

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

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

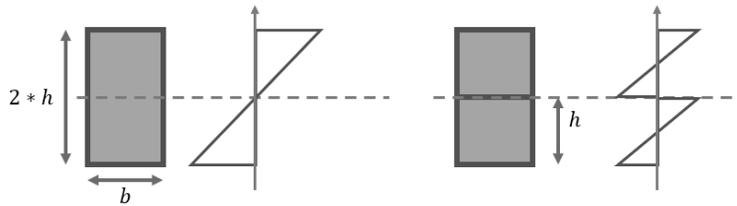


Figure 2 : schéma des contraintes

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.

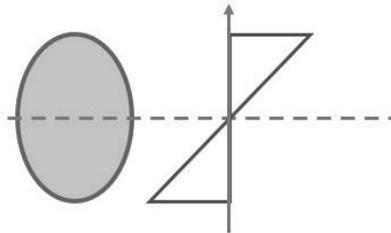


Figure 3 : répartition des contraintes dans une section quelconque

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.

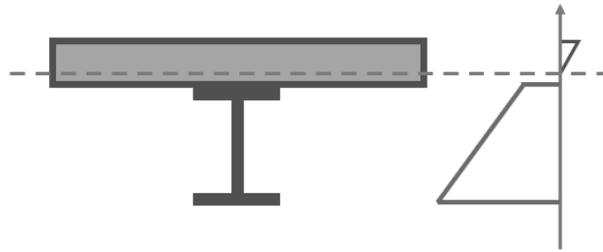


Figure 4 : schéma de principe de répartition des contraintes dans une section mixte

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),