

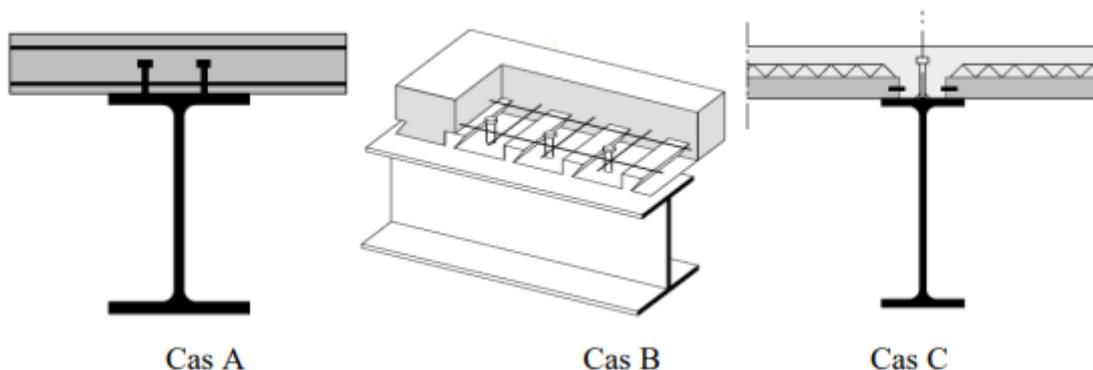
Chapitre 4 : Les Poutres Mixtes (Acier-Béton)

1-Introduction

L'origine des poutres mixtes acier-béton provient du fait que la conception des structures simples traditionnelles métalliques ou en béton présentant chacune des inconvénients : Le béton **n'a pas une bonne résistance caractéristique à la traction**. Les poutres métalliques seules présentent deux inconvénients :

- Grande flèche;
- Danger de déversement pour les sections comprimées d'une poutre fléchie.

Les poutres mixtes peuvent être de la forme illustrée à la figure 1. Il s'agit en général d'un profilé en acier liaisonné avec une dalle de béton. Cette dalle peut être coulée sur un coffrage non permanent (cas A) ou sur un coffrage permanent, comme par exemple une tôle profilée en acier (cas B) ou une série de pré-dalles (cas C).



2- Largeur participante :

Dans les poutres mixtes, le transfert de l'effort de cisaillement par les connecteurs entre la dalle en béton et la poutre métallique ne s'effectue que sur une largeur *beff* dite la largeur participante de la dalle. La valeur de *beff* dépend du rapport de l'espacement $2b_i$, de la portée L des poutres, du type de chargement, de la nature des liaisons (appuis) des poutres, du type de comportement (élastique ou plastique) et d'autres facteurs. L'Eurocode-4 (version ENV 1994-1-1) propose l'expression suivante:

$$beff = be1 + be2 \text{ Avec } be_i = \min(l_0/8, b_i)$$

l_0 : la portée L de la poutre dans le cas d'une poutre sur deux appuis

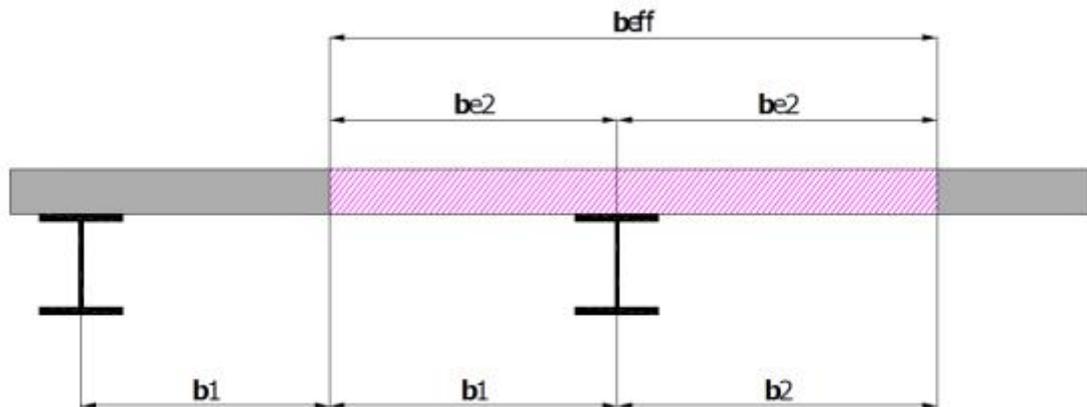


Figure 2 : Largeur participante de la dalle dans le cas d'une poutre sur deux appuis.

Dans le cas d'une poutre continue, l_0 peut être choisie selon les indications données à la figure 3

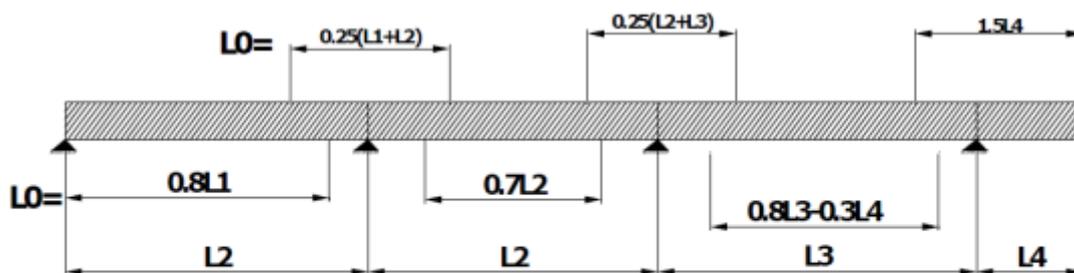


Figure 3: Largeur participante de la dalle dans le cas d'une poutre continue

La valeur de be_{ff} est utile à la détermination de certaines propriétés élastiques de la poutre mixte tel que son moment d'inertie et sert aussi pour la vérification de la résistance des sections transversales.

3-Situations à considérer

A) Stade de montage

Le stade de montage **correspond au moment de bétonnage de la dalle**, quand le **béton n'a pas encore fait prise**. La **résistance est alors assurée par la poutre métallique seule**, qui doit également reprendre, en plus de **son poids propre et de celui de la dalle**, une **charge temporaire de montage** due à une accumulation éventuelle de béton lors du bétonnage, et à la **présence d'ouvrier sur la dalle**. Précisons encore que le **système statique au stade de montage peut être différent** de celui du stade définitif, à cause de la **présence possible**

d'étais. Le rôle d'un étayage est double: diminuer la flèche lors du bétonnage, et, après la prise du béton et l'enlèvement des étais, **reporter une partie importante du poids propre de la dalle sur la poutre mixte et non pas sur la poutre métallique seule.**

Les charges et les actions à considérer sont:

- Le poids propre de la poutre métallique,
- Le poids propre de la dalle,
- Le poids propre du coffrage de la dalle,
- Une charge de montage admise en générale égale à 1 KN/m²,
- L'action due au vent si la structure est à l'extérieure.

B) Stade définitif

Le stade définitif est surtout **caractérisé par le fait que la résistance est maintenant assuré par la poutre mixte.** C'est **au stade définitif** que la poutre mixte **doit reprendre**, outre **les charges dues aux éventuels étais, les charges dues aux finitions** (isolation, chape, etc.) ainsi que **les charges utiles pour lesquelles elle a été conçue.**

Les charges et les actions à considérer sont:

- Le poids propre du profilé,
- Le poids propre de la dalle,
- Les réactions des étais éventuels,
- Le poids des finitions,
- La charge utile,
- L'action due au vent et la charge de la neige.

4-Vérification de la sécurité structurale des poutres mixtes

A) Stade de montage

La vérification de la sécurité au stade de montage se fait, avec les charges définies précédemment à l'aide de la relation suivante.

$$M_f = \frac{M_{ela}}{\gamma_R}$$

M_f : Moment de flexion dû aux charges à considérer au stade de montage,

M_{ela} : Moment élastique de la poutre métallique,

γ_R : Coefficient de sécurité ($\gamma_R = 1,1$).

On utilise au stade de montage un calcul élastique afin d'éviter une plastification de l'acier qui entraînerait des déformations trop importantes.

B) Stade définitif

On tiendra compte de l'effet mixte au stade définitif en considérant la résistance de la section mixte. La résistance est habituellement évaluée à l'aide d'un **calcul plastique** pour les poutres mixtes de bâtiment, et d'un calcul élastique pour les poutres mixtes de pont. La sécurité au stade définitif est donc satisfaite si la relation suivante est vérifiée:

$$M_d = \frac{M_{Rb}}{\gamma_R}$$

M_d : Moment de flexion dû aux charges à considérer au stade définitif,

M_{Rb} : Résistance ultime à la flexion de la section mixte,

γ_R : Coefficient de sécurité ($\gamma_R = 1,1$).

5-Vérification de l'aptitude au service

La vérification de l'aptitude au service d'une poutre mixte consiste essentiellement à vérifier **sa déformation. Le contrôle de la déformation de la poutre mixte se fait quant à lui avec la valeur de service de courte durée de la charge utile.**

6-Calcul de la connexion

Toute la théorie des éléments mixtes acier-béton est basée sur l'hypothèse qu'il existe **une liaison entre l'acier et le béton. L'adhérence du béton sur les poutres métalliques ou sur les tôles est non seulement trop faible, mais également trop peu durable pour réaliser cette liaison**; la transmission des efforts rasants doit donc se faire par l'intermédiaire d'éléments de liaisons appelés **connecteurs ou goujons**.

Pour chaque **tronçon i** de poutre mixte sollicité par **un moment de flexion positif**, l'effort **rasant F_{vi}** obtenu par un calcul plastique vaut donc selon la position de l'axe neutre:

- Axe neutre dans la dalle: $F_{vi} = f_y \times A_a$
- Axe neutre dans le profilé : $F_{vi} = f_c \times A_c$
- A_a : aire de la section d'acier du profilé
- A_c : aire de la section de béton

La vérification ou le dimensionnement des goujons se fait alors en **comparant l'effort rasant F_{vi} à la résistance de l'ensemble des goujons situés sur le tronçon étudiés (i)**. Cela donc revient à satisfaire la relation suivante:

$$F_{vi} \leq n_i \cdot V_{RD}$$

n_i : nombre de goujons sur le tronçon (i) considéré,

V_{RD} : résistance ultime au cisaillement d'un goujon.

Diamètre (d) du goujon	Calcul plastique			Calcul élastique				
	Béton C25/15	Béton C30/20	Béton \geq C35/25	Béton C25/15	Béton C30/20	Béton C35/25	Béton C40/30	Béton C45/35
13 mm	33 KN	39 KN	42 KN	20 KN	23 KN	26 KN	30 KN	33 KN
16 mm	50 KN	58 KN	63 KN	30 KN	35 KN	40 KN	45 KN	50 KN
19 mm	70 KN	82 KN	89 KN	42 KN	49 KN	56 KN	64 KN	71 KN
22 mm	94 KN	111 KN	120 KN	56 KN	66 KN	75 KN	85 KN	95 KN

Tableau 1 : Résistance ultime au cisaillement V_{RD} des goujons à tête

Le calcul plastique permet, au contraire du calcul élastique, d'adopter **sur chaque tronçon de poutre de longueur l_i , un écartement (e) constant entre goujons**. Si l'on a **déjà fait le choix du type de goujon** en connaissant **la résistance ultime au cisaillement V_{RD}** avec le tableau suivant, le nombre n_i de goujons à répartir sur le tronçon (i) est donné par la relation suivante:

$$n_i \geq F_{vi} / V_{RD}$$

Si **par contre l'écartement (e) est connu ou imposé par des dispositions de construction** (on connaît par conséquent le nombre de goujons n_i), le choix des goujons doit alors se faire de façon à ce que la relation suivante soit satisfaite:

$$V_{RD} \geq F_{vi} / n_i$$

L'écartement (e) des goujons est alors déterminé par la relation suivante:

$$e = li / ni$$

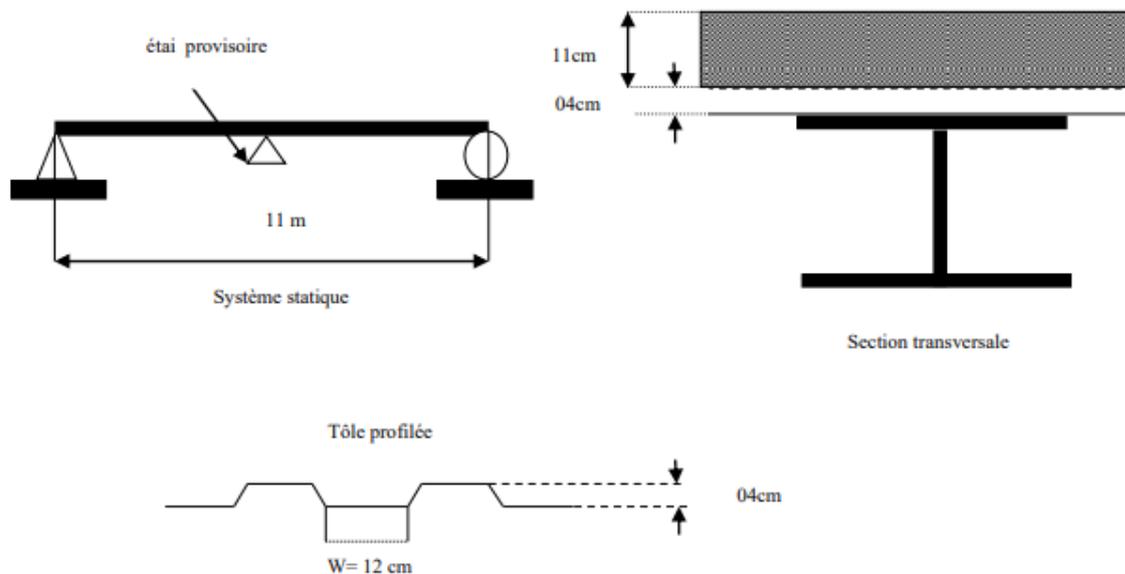
Exemple d'application

Soit la poutre mixte définie à la figure suivante. Elle est composée d'un profilé **HEA 300** en acier **S235** ($f_y = 235 \text{ MPa}$), d'une dalle en béton **C40/30** ($f_c = 19,5 \text{ N/mm}^2$) et d'une tôle profilée. Sa portée l est de **11 m** et l'écartement entre deux poutres est $a = 2 \text{ m}$. Lors du bétonnage de la dalle, on tiendra compte de la présence **d'un étais placé à mi-travée** et **d'une charge de montage de 1 KN/m^2** . Au stade définitif, on tiendra compte des deux charges suivantes:

Finitions (Chape + revêtement) = $0,5 \text{ KN/m}^2$, • Charge utile = 1 KN/m^2 et valeur de service de courte durée = $1,5 \text{ KN/m}^2$.

1- Vérifier cette poutre au stade de montage puis au stade définitif (comme il s'agit d'une poutre mixte de bâtiment, on négligera l'effet de du retrait).

2- Déterminer le nombre de goujons à tête de diamètre 16 mm nécessaire pour assurer la connexion entre l'acier et le béton.



Solution :

1. Charges à considérer

A) Stade de montage

-Poids propre du profilé HEA 300 : $ga = 0,88 \text{ KN/m}$

-Poids propre de la dalle: $gd = \rho b \times hd \times a = 25 \text{ KN m}^2 \times 0,15\text{m} \times 2\text{m} = 7,5\text{KN/m}$ (Pour simplifier les calculs, on a pris la totalité de la hauteur de la dalle et négligé le poids de la tôle)

-Charge de montage : $q_0 = 1 \text{ KN/m}^2 \times a = 1 \times 2 = 2 \text{ KN/m}$

La valeur de dimensionnement au stade de montage est:

$$q_{sm} = 1,35 (ga + gd) + 1,5(q_0) = 1,35(0,88 + 7,5) + 1,5(2) = 14,313 \text{ KN/m}$$

B) Stade définitif

-Poids propre du profilé HEA 300 : $ga = 0,88 \text{ KN/m}$

-Poids propre de la dalle: $gd = \rho b \times hd \times a = 25 \text{ KN m}^2 \times 0,15\text{m} \times 2\text{m} = 7,5\text{KN/m}$

-Poids des finitions: $g_0 = 0,5 \text{ KN/m}^2 \times a = 0,5 \times 2 = 1 \text{ KN/m}$

-Charge utile : $q_r = 1 \text{ KN/m}^2 \times a = 1 \times 2 = 2 \text{ KN/m}$

La valeur de dimensionnement au stade de définitif est:

$$q_{sd} = 1,35 (ga + gd + g_0) + 1,5(q_0 + q_r) = 1,35(0,88 + 7,5 + 1) + 1,5(2) = 15.663 \text{ KN/ m}$$

2- Vérification de la sécurité structurale

A) Stade de montage

Le calcul se fera dans le domaine élastique de la résistance.

$$M_{ela} = f_y \times W_{ely_{HEA 300}} = 235 \text{ N/mm}^2 \times 1260.10^3 \text{ mm}^3 = 296.1 \text{ KN. m}$$

Le moment de flexion sur l'appui intermédiaire crée par l'étau est:

$$M_f = \frac{q_{sm} \cdot \left(\frac{l}{2}\right)^2}{8} = \frac{14,313 \times 5,5^2}{8} = 54.12 \text{ KN. m}$$

D'où $M_f = 54.12 \text{ KN} \cdot \text{m} \leq M_{ela} / \gamma_R = 296.1 / 1,1 = 269.18 \text{ KN} \cdot \text{m} \dots \dots \text{Condition vérifiée}$

B) Stade définitif

Le calcul se fera dans le domaine plastique de la résistance.

$$M_{pl} = f_y \times W_{ply_{HEA 300}} = 235 \text{ N/mm}^2 \times 1383.10^3 \text{ mm}^3 = 325.01 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

Le moment de flexion est:

$$M_d = \frac{q_{sd} \cdot \left(\frac{l}{2}\right)^2}{8} = \frac{15,663 \times 11^2}{8} = 236.9 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

D'où $M_d = 236.9 \text{ KN} \cdot \text{m} \leq M_{pl} / \gamma_R = 325.01 / 1,1 = 295.46 \text{ KN} \cdot \text{m} \dots \dots \text{Condition vérifiée}$

3. Vérification de l'aptitude au service

La flèche de la poutre mixte due à la charge

$$q_{ser} = 1,5 \text{ KN/m}^2 \times a = 3 \text{ KN/m}$$

$$f = \frac{5}{384} \times \frac{q_{ser} \times l^4}{E \times I_y} = \frac{5}{384} \times \frac{3 \times 11^4}{210 \times 10^6 \times 18260 \times 10^{-8}} = 0.015 \text{ m} = 15 \text{ mm}$$

La flèche admissible :

$$\bar{f} = \frac{l}{350} = \frac{11}{350} = 0.03 \text{ m} = 30 \text{ mm}$$

D'où $f = 15 \text{ mm} < \bar{f} = 30 \text{ mm} \dots \dots \text{Condition vérifiée}$

4-Calcul du nombre de goujons

Comme l'axe neutre plastique se trouve dans la dalle, l'effort rasant à transmettre correspond à la plastification de la section d'acier est calculé par la formule suivante:

$$F_{vi} = f_y \times A_a = 235 \text{ N/mm}^2 \times 11250 \text{ mm}^2 = 2643.75 \text{ KN}$$

Selon le Tableau 1,

La résistance ultime au cisaillement d'un goujon de diamètre 16mm vaut $V_{RD} = 63 \text{ KN}$.

Le nombre de goujons nécessaire sur la demi-longueur de la poutre est donc:

$$n_i \geq F_{vi} / V_{RD} = 2643.75 / 63 = 41.96 \approx 42 \text{ Goujon}$$

Ce qui correspond à un écartement (e) des goujons

$$e = li/ni = 5500\text{mm}/42 = 130.95\text{mm}$$