

## Chapitre 1 : Les constructions mixtes dans les bâtiments

### 1. Généralités :

L'association de l'acier et du béton est la combinaison de matériaux de construction la plus fréquemment rencontrée tant dans les bâtiments que dans les ponts. Bien que de nature franchement différente, ces deux matériaux sont complémentaires:

- Le béton résiste en compression et l'acier en traction.
- Les éléments métalliques sont relativement élancés et sujets au voilement, le béton peut empêcher le voilement.
- Le béton assure à l'acier une protection contre la corrosion et une isolation thermique aux températures élevées.
- L'acier permet de rendre la structure ductile.

Le dimensionnement des structures de bâtiments et de ponts est dominé principalement par la réalisation et le support de surfaces horizontales. Dans les bâtiments, les planchers sont généralement réalisés en béton armé par des armatures en acier pour résister à la traction.

Cependant lorsque les portées augmentent, il est plus économique de supporter la dalle, par exemple par des poutres, plutôt que d'épaissir le plancher.

Dans les structures de bâtiment, le grillage de poutres est soutenu à son tour par des poteaux. Les poutres et les poteaux peuvent être réalisés en utilisant des sections acier, généralement des profilés laminés en I et en H. Auparavant, il était usuel de dimensionner l'ossature métallique pour reprendre seule l'ensemble des charges, mais depuis les années 50, il est devenu de plus en plus courant de connecter les dalles de béton aux poutres les supportant à l'aide de moyens mécaniques. Ces derniers éliminent ou du moins réduisent le glissement à l'interface acier-béton de telle façon que la dalle et la poutre métallique agissent ensemble comme un élément unique, communément appelé "poutre mixte".

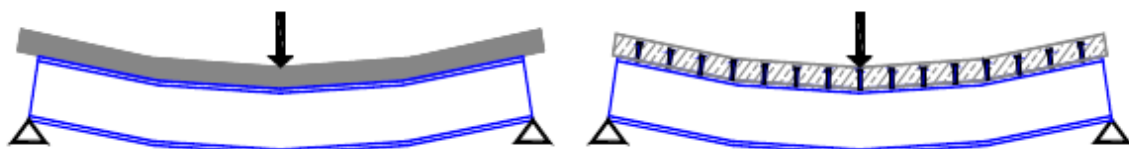


Figure 1 Poutres non mixte et mixte

Pratiquement, la connexion est assurée par des goujons à tête ou d'autres connecteurs qui sont soudés ou fixés par pistolet à l'acier structurel et enrobés par le béton.

Les éléments mixtes que sont les poutres mixtes, les poteaux mixtes et les dalles mixtes avec tôle profilée sont utilisés depuis de nombreuses années. Des hypothèses simplificatrices sur l'interaction entre l'acier structurel et la dalle de béton ont permis de considérer la construction mixte comme une simple extension de la construction métallique.

L'application de cette technologie ayant montré son efficacité, des projets de recherche à grande échelle ont démarré à l'échelle mondiale en vue d'améliorer les connaissances.

## **2. Raisons d'utiliser des structures mixtes :**

Tout dimensionnement doit non seulement prendre en compte l'optimisation de la résistance aux charges, de la raideur et de la ductilité mais également les aspects architecturaux, économiques, de fabrication et d'utilisation des poutres, dalles et poteaux.

### **2.1. Aspects architecturaux :**

Les structures mixtes permettent de nombreuses variations architecturales pour combiner les différents types d'éléments mixtes.

En plus de réduire les dimensions des poutres, la construction mixte permet

- des portées plus importantes
- des dalles plus minces
- des poteaux plus élancés et offre une grande flexibilité et de nombreuses possibilités lors de la conception.

### **2.2. Aspects économiques :**

L'intérêt économique des structures mixtes provient de dimensions plus réduites (la rigidité plus élevée entraîne des flèches plus faibles, des portées plus grandes et des hauteurs totales plus faibles) et d'une construction plus rapide.

Les rapports portée sur hauteur ( $l/h=35$ ) des poutres sont faibles et peuvent présenter plusieurs avantages:

- La réduction des hauteurs permet de réduire la hauteur totale du bâtiment et permet dès lors une diminution de la surface des murs extérieurs

- Les portées plus grandes pour des hauteurs identiques (par rapport aux autres méthodes de construction) permettent de réduire le nombre des poteaux par plancher ce qui offre plus de flexibilité
- Pour une même hauteur totale de bâtiment, celui-ci peut présenter plus d'étages.

Les structures mixtes sont simples à construire et présentent des temps de construction réduits:

- ✓ économie de coûts suite à la réalisation plus rapide du bâtiment
- ✓ coûts de financement plus faibles
- ✓ prêt à l'emploi plus rapidement et donc revenu d'utilisation plus élevé

### **2.3. Fonctionnalité :**

Les structures métalliques traditionnelles présentent des systèmes de protection au feu rapportés qui permettent d'isoler l'acier de la chaleur due à l'incendie. Les structures métalliques et mixtes actuelles peuvent présenter une résistance au feu en utilisant les principes des constructions en béton armé dans lesquelles le béton protège l'acier grâce à sa masse élevée et sa conductivité thermique relativement faible.

Tout comme les planchers mixtes qui peuvent résister au feu, les poutres mixtes peuvent également être utilisés sans protection des semelles mais avec un enrobage de béton armé entre les semelles. Ce béton ne sert pas uniquement à maintenir des températures relativement basses dans la semelle supérieure et dans l'âme mais également à apporter de la résistance flexionnelle compensant la perte de résistance de la semelle inférieure portée à haute température.

### **2.4. Equipements et utilisation flexible du bâtiment :**

Les structures mixtes s'adaptent aisément aux modifications susceptibles de se produire durant la vie d'un bâtiment. Cela est particulièrement le cas lorsque la dalle est en présence de structures en portiques. Il est alors toujours possible de créer une nouvelle cage d'escalier entre deux planchers en ajoutant simplement les poutres de renvoi nécessaires.

Les évolutions récentes dans les technologies informatiques, de communication et d'information ont montré l'importance d'être capable de modifier rapidement l'organisation des équipements d'un bâtiment. De plus, dans les bâtiments commerciaux ou en copropriété, il doit être possible de modifier les équipements sans occasionner d'inconvénient aux autres occupants. Pour résoudre ces problèmes, les ingénieurs doivent choisir entre plusieurs solutions.

Il y a généralement trois manières d'installer les équipements:

- dans les faux-plafonds
- dans un faux-plancher
- dans des caissons situés le long des murs

L'espace entre les semelles d'une poutre mixte constitue une zone idéale dans laquelle les équipements peuvent être installés.

## **2.5. Montage :**

Les planchers mixtes sont maintenant la solution privilégiée pour une grande variété de structures car ils offrent aux concepteurs et aux clients les avantages suivants :

### **2.5.1. Plate-forme de travail:**

Avant le bétonnage, la tôle profilée constitue une plate-forme de travail sûre et qui permet d'accélérer le processus de construction d'autres éléments.

### **2.5.2. Coffrage permanent:**

La tôle profilée porte de poutre à poutre et sert de coffrage permanent au béton tel que généralement des étais provisoires ne sont pas nécessaires. La tôle profilée est également une barrière efficace à la vapeur.

La retombée de la poutre reste propre après le bétonnage et l'utilisation de tôles peintes peut donner un bon aspect au plafond mais la peinture peut causer des difficultés en cas de soudage des goujons à travers la tôle.

### **2.5.3. Armatures:**

La section d'acier du profilé métallique est généralement suffisante pour résister, en tant qu'armature, au moment de flexion positif. Des armatures supplémentaires peuvent être présentes dans la dalle pour résister au retrait, aux mouvements dus à la température ou afin d'assurer une continuité aux appuis (moment négatifs). L'action mixte est obtenue grâce à la forme du profil ou à l'aide de moyens mécaniques tel que des indentations ou un bossage de la tôle profilée.

#### 2.5.4. Vitesse et simplicité de construction :

Les tôles profilées combinant une rigidité élevée et un faible poids rendent aisé le transport et le stockage du matériel sur chantier. Un camion est souvent capable de transporter jusqu'à 1500m<sup>2</sup> de plancher. Une équipe de quatre hommes peut installer 400m<sup>2</sup> de plancher par jour.

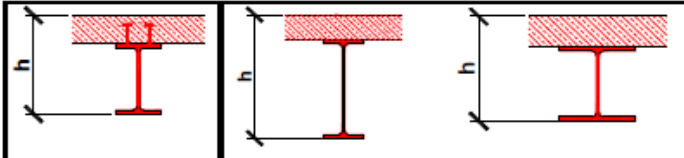
Les panneaux sont légers et sont des éléments préfabriqués qui peuvent être aisément transportés et installés par deux ou trois hommes.

#### 2.5.5. Produits à la qualité contrôlée:

Les éléments métalliques des structures mixtes sont fabriqués et contrôlés en usine. Cela permet l'établissement de procédures de qualités strictes qui diminuent l'incertitude liée au travail sur chantier. Le résultat en est une précision de construction plus élevée.

#### 2.6. Comparaison avec d'autres méthodes :

Pour pouvoir user des effets de synergie et profiter des avantages disponibles possibles, il est nécessaire d'utiliser des éléments mixtes, les éléments mixtes présentant une rigidité et une capacité de charge plus grandes qu'un élément métallique présentant les mêmes dimensions.




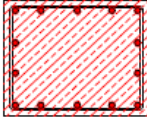
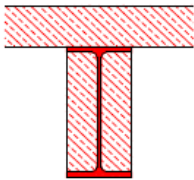
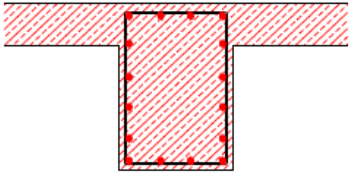
	Poutre mixte	Poutre métallique sans connexion au cisaillement	
Section métallique	IPE 400	IPE 550	HE 360 B
Hauteur [mm]	560	710	520
Charge	100%	100%	100%
Poids d'acier	100%	159%	214%
Hauteur totale	100%	127%	93%
Rigidité	100%	72%	46%

**Tableau 1 Poutre mixte – Poutre métallique**

Le Tableau 1 compare une poutre mixte avec deux types de poutres métalliques sans connexion de cisaillement dans la dalle de béton. La capacité de charge est sensiblement identique mais les différences de rigidités et de hauteur totale sont clairement mises en évidence.

Généralement, les dimensions des sections d'éléments mixtes sont bien inférieures à celles des éléments correspondant en béton armé ou en acier seul.

**Tableau 2 Comparaison d'éléments mixtes et en béton armé**

	Mixte	Béton armé
Poteau		
Dimensions [cm]	70 / 70	80 / 120
Poutre		
Dimensions [cm]	160 / 40	160 / 120

Le Tableau 2, par exemple, compare les tailles de poteaux et poutres mixtes relativement importantes avec leur équivalent en béton armé pour des conditions de chargements identiques.

### 3. Méthode de construction :

Généralement deux méthodes opposées de construction sont utilisées, chacune présente ses avantages et ses inconvénients qu'il est utile de mentionner.

**La méthode de construction conventionnelle en béton** permet une grande variété de style et de formes, elle est simple à mettre en œuvre sur chantier et offre une résistance thermique, une isolation phonique et une résistance contre les agents chimiques agressifs. **Cependant**, le poids propre est élevé en regard de la résistance, le coffrage et le durcissement du béton demandent un temps important. De plus, comme le béton est incapable de résister à la traction, la mise en place d'armatures est nécessaire, ce qui allonge encore le temps de construction.

L'avantage principal de la **Construction métallique** est sa grande capacité portante pour un faible poids. La fabrication pouvant se dérouler indépendamment des conditions météorologiques, l'érection qui suit est très simple et se réalise avec des tolérances faibles. La résistance au feu des structures métalliques peut causer problème. Cette difficulté peut seulement être résolue en utilisant des sections plus importantes ou à l'aide de mesures de prévention coûteuses. La nécessité de disposer de travailleurs mieux formés doit être également mentionnée à décharge de la construction métallique.

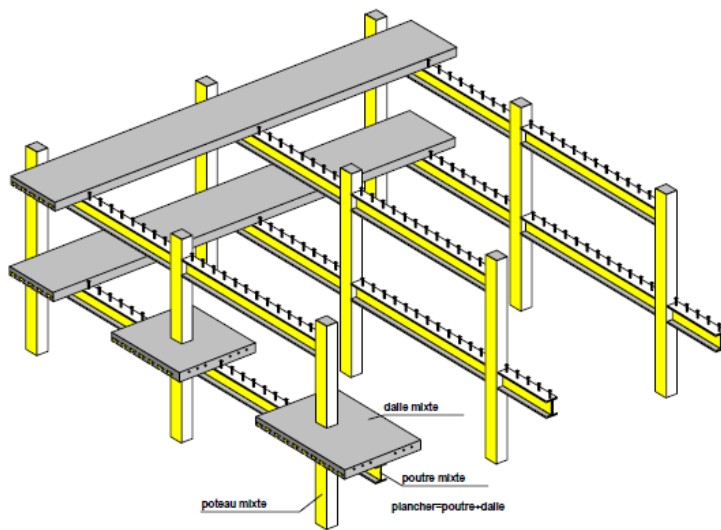
La comparaison de ces deux méthodes montre que leur combinaison est la voie la plus économique. En plus de présenter les avantages de chacune de ces méthodes, d'autres avantages peuvent apparaître. Ainsi par exemple, les éléments mixtes peuvent présenter des capacités de

charge plus élevées que des éléments métalliques ou en béton armé. La rigidité et la redistribution plastique peuvent également être augmentées en combinant l'acier et le béton.

Réaliser une structure mixte de manière économique peut se faire suivant les opérations suivantes:

- Tout d'abord, l'ossature métallique contreventée ou non est érigée. Si des tubes creux sont utilisés pour les poteaux, les cages d'armatures peuvent déjà être positionnées en atelier.
- Tous les corbeaux, ailettes et goujons (boulons sans têtes ou clous tirés au pistolet) assurant le transfert d'efforts entre l'acier et le béton doivent être préparés en atelier pour accélérer l'érection sur chantier qui demande une planification détaillée. Après avoir positionné les poteaux, les poutres métalliques sont simplement appuyées entre elles.
- Les éléments en béton armé ou la tôle profilée sont disposées entre les poutres servant à la fois de coffrage et de plate-forme de travail.

#### 4. Eléments de construction



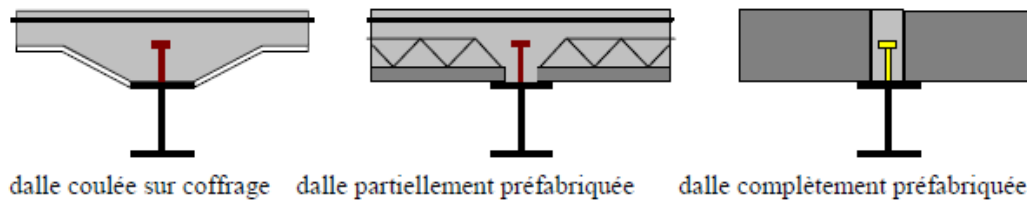
Poteaux et dalles sur chantier (Citibank Duisburg, Allemagne)

#### 4.1. Dalles en béton armé :

Suivant la complexité de la forme du plancher, de la planification et des capacités de préfabrication en atelier, des dalles en béton armé peuvent être fabriquées

- sur site en utilisant des coffrages
- en utilisant des éléments partiellement préfabriqués
- en utilisant des éléments entièrement préfabriqués

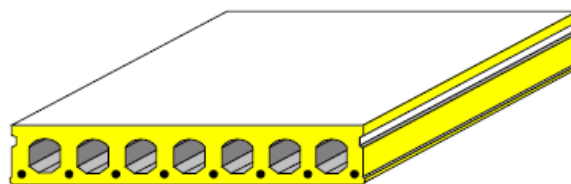
Pour ces différentes possibilités illustrées à la Figure suivante, il est possible d'utiliser du béton normal ou léger. Pour des dalles entièrement préfabriquées, il faut prêter attention que seul le peu de béton coulé entre les interstices pourra agir de manière mixte avec les poutres.



#### 4.2. Dalles alvéolées en béton précontraint :

Ces dernières années, des dalles précontraintes ont souvent été utilisées pour de grandes portées entre poutres métalliques. Originellement, ces éléments étaient destinés à être utilisés entre des supports rigides tels que des murs raides en béton. Il faut donc être conscient des problèmes auxquels on est confronté en augmentant le domaine d'application de ces dalles:

- Des appuis flexibles comme les poutres (acier, béton ou mixte) mènent à de la flexion transversale
- L'action mixte non souhaitée mène à des contraintes de cisaillement transversal.
- L'échauffement local des semelles de poutres servant d'appui peut provoquer la rupture des ancrages et réduire la résistance au cisaillement des nervures de béton
- Une attention particulière doit être prêté aux déformations thermiques différentielles à proximité des extrémités



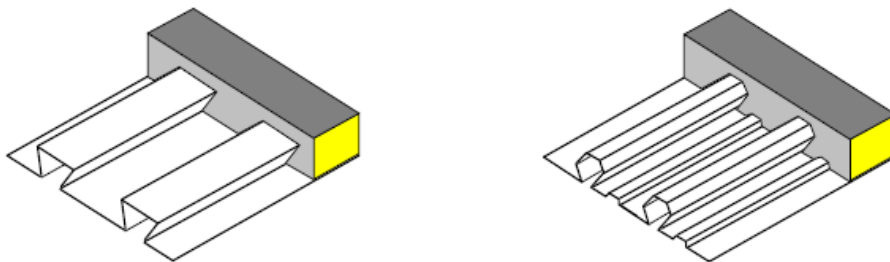


#### 4.3. Couverture en tôle profilée :

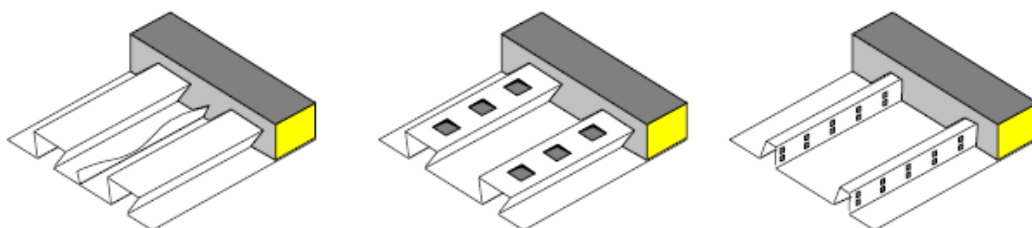
A la fois des tôles profilées trapézoïdales conventionnelles et des tôles propres aux planchers mixtes sont utilisées. S'il n'y a pas moyen d'assurer une action mixte, les profilés acier reprennent l'ensemble de la charge verticale (tôles profilées de grande hauteur; le béton entre les nervures servant uniquement à la répartition des charges) ou ils sont uniquement utilisés comme coffrage perdu en négligeant la contribution qu'ils pourraient apporter à l'état final. Ces deux extrêmes mènent à une utilisation non économique des deux matériaux.

Dans les dalles mixtes, plusieurs possibilités existent pour assurer une liaison entre l'acier et le béton:

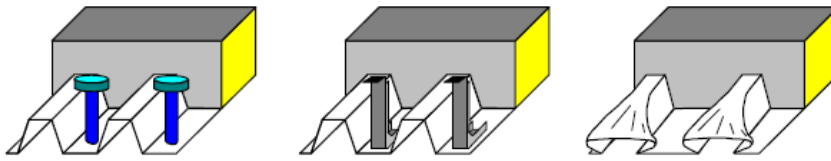
- La liaison chimique fragile et peu fiable, dès lors, elle ne doit pas être considérée dans les calculs
- La liaison de frottement, incapable de transférer des efforts de cisaillement important
- La liaison mécanique assurée par un bossage de la tôle profilée
- La liaison par ancrage d'extrémité tel que des boulons à tête, des cornières ou des déformations d'extrémité de la tôle, elle entraîne une introduction de charge très localisée à l'extrémité et donc une augmentation soudaine de la résistance métallique seule à la résistance mixte,



**Liaison par frottement dans les dalles mixtes**



**Liaison mécanique dans les dalles mixtes**

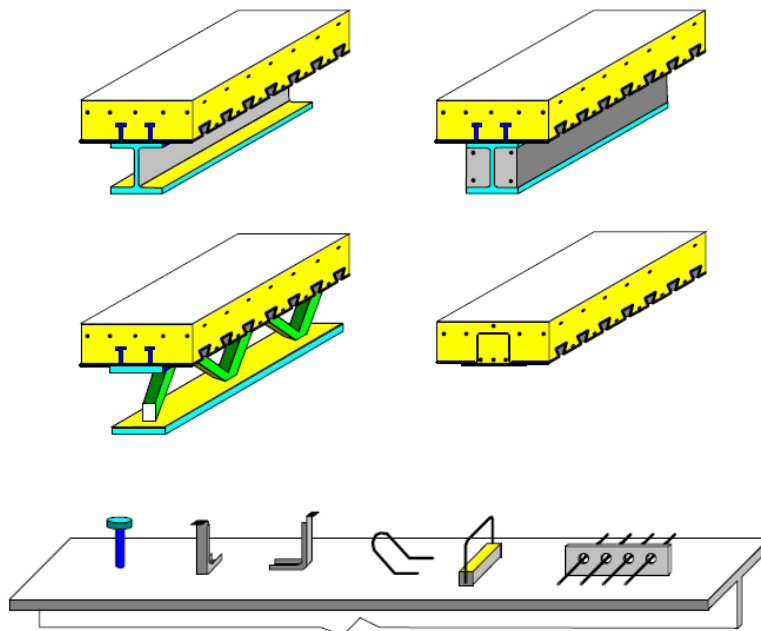


#### Ancrage d'extrémité dans les dalles mixtes

#### 4.4. Poutres :

Les poutres supportant les dalles et amenant les charges aux poteaux sont le deuxième élément du plancher. Dépendant de la disposition des poutres, les dalles portent dès lors dans une seule direction. Suivant la philosophie de structures mélangeant plusieurs technologies, ces poutres peuvent être métalliques, en béton, mixtes ou même faites d'autres matériaux ou de leurs combinaisons. Dans ce qui suit, seul les poutres de plancher mixtes seront traitées en détail.

Par l'intermédiaire des connecteurs de cisaillement, le béton de la dalle est comprimé dans les zones de flexion positive de la poutre. Les goujons à tête sont les plus utilisés en pratique. Ils présentent l'avantage de combiner une rigidité relativement élevée avec une grande capacité de déformation. Les goujons à tête peuvent être disposés avec un espacement suffisant qui facilite grandement leur utilisation. Leur inconvénient est lié au problème de soudabilité, particulièrement lors de l'utilisation de tôles galvanisées ou de semelles de poutres peintes mais également en présence d'eau entre la tôle profilée et la semelle.



Les grandes rigidités et capacité portante des poutres mixtes permettent la construction de très grandes pièces libres de tout poteau pour un poids de construction limité. Jusqu'à aujourd'hui, les poutres mixtes ont été construites comme bi-appuyées ou continues, les assemblages rigides aux poteaux ayant été évités par manque de connaissance. Pour les parties métalliques, des IPE-, HEA-, HEB-, des U mais également des profilés reconstitués soudés sont utilisés pour les portées communes. Pour un espacement de poteaux encore plus grand, des poutres ajourées ou des treillis peuvent être nécessaires.

## 2.5. Poteaux :

A côté de la possibilité de réaliser des poteaux métalliques ou en béton uniquement, la capacité portante des poteaux mixtes est largement dominée par la partie métallique de ceux-ci.

Les poteaux mixtes sont généralement utilisés en présence d'efforts normaux élevés et d'un souhait de sections de faibles dimensions. Comme les poteaux mixtes peuvent être préfabriqués ou préparés en atelier, le temps de construction peut être fortement réduit par rapport à la construction sur place en béton armé.

L'avantage principal des poteaux mixtes par rapport aux poteaux métalliques est la grande résistance au feu de ceux-ci sans la mise en œuvre de mesures préventives.

