

## Construction mixte Acier - béton à base de poutrelles laminées





# Construction mixte Acier - béton à base de poutrelles laminées

## Sommaire

|  |    |
|--|----|
| Introduction . . . . .   | 3  |
| Les normes européennes . . . . .   | 5  |
| Les poutres mixtes classiques . . . . .  | 8  |
| La connexion dans les poutres . . . . .  | 10 |
| Calcul des poutres mixtes . . . . .  | 12 |
| Les poutres mixtes<br>partiellement enrobées . . . . .                               | 14 |
| Calcul des poutres prébétonnées . . . . .  | 16 |
| Vérification de la résistance au feu<br>des poutres partiellement enrobées . . . . . | 17 |
| Types de poteaux mixtes . . . . .  | 19 |
| Calcul des poteaux mixtes . . . . .  | 21 |
| La connexion dans les poteaux mixtes . . . . .                                       | 24 |
| Résistance au feu des poteaux mixtes . . . . .                                       | 26 |
| Détails constructifs . . . . .   | 29 |
| Choix du type de poteau mixte . . . . .  | 31 |
| Les poteaux préfondés . . . . .  | 32 |
| Les assemblages . . . . .  | 35 |
| Stabilité d'ensemble des structures . . . . .  | 41 |



*City Centre Kirchberg, Luxembourg (L)*

## Introduction

La construction mixte acier-béton est connue depuis longtemps pour la réalisation de poutres mixtes classiques utilisées pour les bâtiments et pour les ponts.

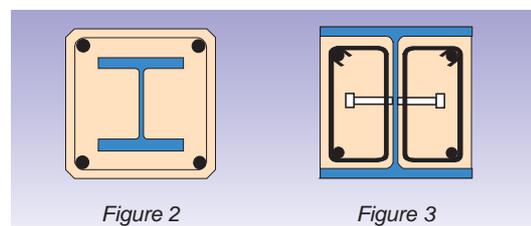
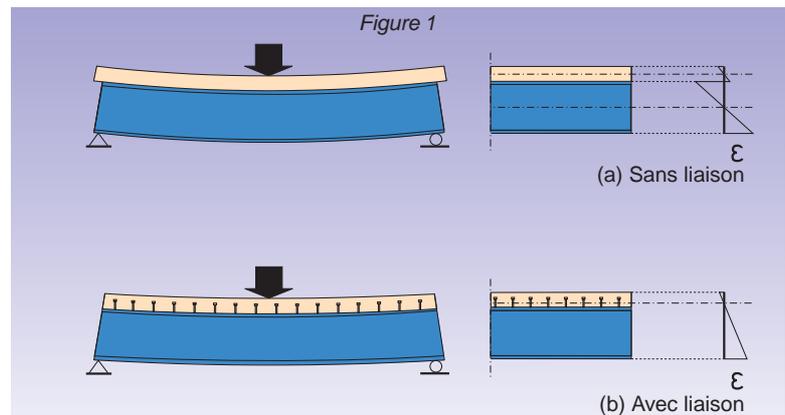
Par cette conception simple, le profilé métallique est connecté mécaniquement à la dalle de béton qu'il porte. Grâce à la résistance au cisaillement apportée à l'interface par la connexion, les deux matériaux de construction traditionnels sont ainsi associés en flexion. La dalle en béton armé qui remplit déjà son office de surface porteuse horizontale, est utilisée en outre comme élément comprimé de la section mixte. Elle apporte ainsi un gain de résistance et de rigidité à la poutrelle, qui constitue essentiellement l'élément tendu de l'ensemble en flexion (figure 1).

Les poteaux métalliques, de leur côté, ont été souvent enrobés de béton dans le passé pour des raisons de protection au feu, avant que n'apparaissent de véritables poteaux mixtes, dans lesquels le béton armé enrobant les profils contribue à la reprise des charges verticales (figure 2).

Dans les années 80, on a découvert (ou redécouvert) que même un enrobage partiel de béton (figure 3) confère à un poteau mixte une résistance au feu appréciable. La forme creuse des profilés H favorise un remplissage de béton à plat au sol avant montage des pièces, éliminant ainsi les frais de coffrage. Cette économie compense un certain surdimensionnement, parfois nécessaire pour atteindre les plus hautes classes de résistance au feu. De nombreux travaux de recherche ont abouti à mettre au point des méthodes de calcul fiables pour la prévision de la résistance au feu de poteaux prébétonnés entre les ailes.



Charpente en construction mixte acier-béton



La même technique a été ensuite étendue aux poutres (figure 4) pour augmenter leur résistance au feu. Dans cette configuration, l'aile inférieure soumise au feu se relâche progressivement, mais sa perte de résistance est compensée par les armatures situées en bas des chambres du profilé métallique.

En même temps, le calcul des poutres mixtes s'est enrichi de méthodes permettant la prise en compte de continuités (béton fissuré) et d'une connexion mécanique partielle, conduisant à un certain glissement entre les deux composants.

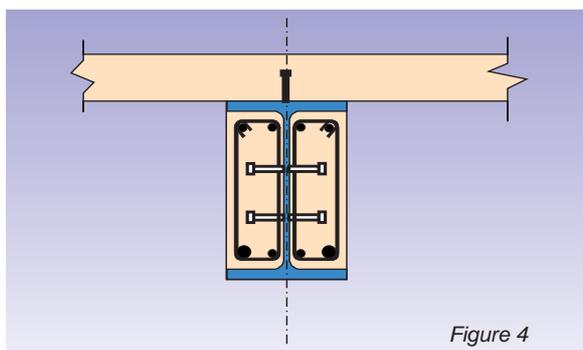


Figure 4

La construction mixte offre donc des possibilités supplémentaires aux structures traditionnelles en acier, protégées du feu ou non selon les exigences de stabilité au feu. En raison des facilités d'assemblage inhérentes à l'acier, des éléments mixtes et non mixtes, protégés ou non, peuvent être associés dans un même projet.

La résistance au feu structurelle de la construction mixte a beaucoup contribué à son succès, avec l'avantage de pouvoir conserver à la structure porteuse des surfaces métalliques apparentes et utilisables. Relevons en outre l'excellent comportement aux sollicitations sismiques des structures mixtes acier-béton.





## Les normes européennes

### Base générale du calcul

La construction mixte s'est rapidement développée dans les pays qui disposaient de normes et de recommandations sur le sujet. Des méthodes d'évaluation de la résistance au feu ont été proposées dans les années quatre-vingt sous forme d'agrément particuliers à chaque pays.

A présent, les Eurocodes apportent une généralisation appréciable des méthodes de calcul, non seulement pour les conditions normales d'utilisation, mais aussi pour la situation d'incendie.

Dans le concept général des Eurocodes, les actions extérieures appliquées sur une structure sont affectées d'un facteur de pondération dépendant de leur nature et de leur variation dans le temps. Pour toute combinaison possible de ces actions, la résistance ultime de chaque élément et de l'ensemble doit être assurée. En outre, pour les poutres essentiellement, il convient encore de vérifier que certaines limites ne sont pas dépassées en situation réelle de service: ce sont les critères de déformation, de vibration, et de fissuration du béton, constituant ce qu'on appelle les états limites de service.

L'Eurocode 4 (ENV 1994-1-1) fournit des règles de calcul pour les poutres mixtes ou pour les poteaux mixtes dans les conditions normales, tandis que la partie 1-2 (ENV 1994-1-2) donne différentes méthodes d'évaluation de la capacité portante à l'incendie de ces mêmes sections.

L'Eurocode 1 (ENV 1991) définit quant à lui les actions à combiner dans les calculs, mais aussi les facteurs de pondération à utiliser en

service normal et pour la vérification de la stabilité au feu. Dans une situation accidentelle d'incendie, ces facteurs sont inférieurs à 1,00 pour la plupart des actions non permanentes dont la probabilité d'occurrence avec une intensité maximum en même temps qu'un incendie majeur est faible.

Ces normes ont été complétées dans chaque pays par un Document d'Application National (DAN).

Les exigences en matière de résistance au feu restent définies au niveau national, et, malheureusement, présentent une certaine disparité entre les différents pays.

### Qualité des matériaux

L'Eurocode 4 couvre l'utilisation d'un grand choix de qualités des matériaux acier et béton associés dans un élément mixte.

La gamme des aciers usuels de construction S235, S275 et S355 est complétée par les qualités supérieures S420 et S460, disponibles à partir du procédé QST (poutrelles HSTAR) et particulièrement intéressantes pour des éléments soumis à de fortes charges.

De plus, l'excellente soudabilité de l'acier HSTAR permet un parachèvement économique (pas de préchauffage ni de post-chauffage).

Ces aciers peuvent être associés aux bétons de qualité C20 à C50, d'agrégats normaux ou légers, et aux armatures disponibles sur le marché, dont la qualité S500 est la plus commune.

## Résistance au feu: ENV 1994-1-2

Les éléments mixtes partiellement ou complètement enrobés possèdent une résistance au feu appréciable. Elle ne peut cependant plus être évaluée à partir de la température critique de l'acier, notion simple applicable aux pièces métalliques nues ou protégées lorsque leur température est quasi uniforme sur une section transversale.

La présence du béton augmente l'effet de masse et l'inertie thermique de l'élément. Le champ des températures internes à un moment donné d'un incendie est fondamentalement non uniforme, dans l'acier comme dans le béton, et présente des gradients importants. L'existence de zones relativement froides au coeur de la masse assure encore une résistance suffisante pour maintenir pendant un certain temps la stabilité de l'élément soumis au feu.



*Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Marne-la-Vallée (F)*



Immeuble de bureaux, rue Reaumur, Paris (F)

La partie 1-2 de l'Eurocode 4 admet différentes possibilités pour justifier la résistance au feu d'un élément mixte :

- Utilisation de tables résultant essentiellement de conditions observées lors d'essais.
- Calcul d'une capacité portante ultime par une méthode simplifiée, établie sur base de nombreux essais.
- Simulation numérique au moyen d'un logiciel suffisamment validé par des essais, tel que CEFICOSS, opérationnel dans les services d'assistance de Arcelor Sections Commercial.

La précision et le champ d'application augmentent en passant du premier niveau cité au troisième, le grand intérêt d'un logiciel tel que CEFICOSS étant de pouvoir traiter des structures complètes de manière réaliste, qu'elles soient souples ou rigides.

Les poteaux ou les poutres complètement enrobés de béton se vérifient généralement par les tables du premier niveau qui sont dans ce cas d'usage très simple, alors que les méthodes simplifiées du deuxième niveau sont utilisées le plus souvent pour les éléments bétonnés entre les ailes.

## Références

Certaines publications permettent d'étendre la vérification de la résistance au feu à d'autres sections mixtes et à des cas de sollicitation plus complexes. Citons en particulier :

[1] ECCS/CECM - N°55. "Calculation of the fire resistance of centrally loaded composite steel concrete columns exposed to the standard fire." Edition 1988

[2] Report EUR 13309 EN, Schleich, Mathieu, Cajot: "Practical design tools for composite steel concrete construction elements submitted to ISO-fire considering the interaction between axial load N and bending moment M."

[3] Hosser, Dorn, El-Nesr: "Entwicklung und Absicherung praxisgerechter Näherungsverfahren für die brandschutztechnische Bemessung von Verbundbauteilen. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt A39 (S24/2/91) der Stiftung Stahlanwendungsforschung". Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB), TU Braunschweig, Juni 1993.

[4] B. Zhao: "Abaques de dimensionnement pour la résistance au feu des solives de plancher non protégées connectées à des dalles mixtes." - Revue "Construction métallique" - N° 1 - 1999

Construction mixte avec poutrelles alvéolées



## Les poutres mixtes classiques

### Poutrelle et dalle

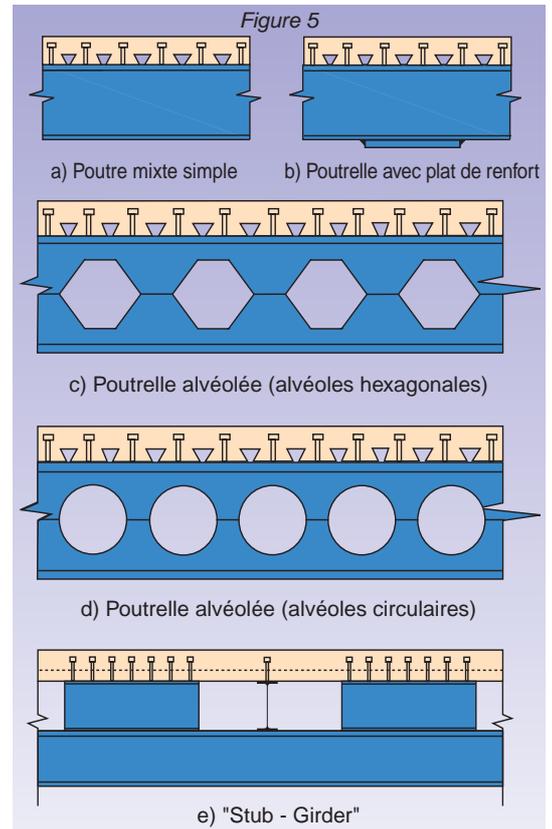
Les poutres mixtes peuvent être réalisées à partir de poutrelles laminées dans différentes configurations (figure 5) dont la première (figure 5a) est la plus simple et la plus usuelle. Les portées courantes varient de 6 à 16 mètres, mais peuvent dépasser les 20 mètres.

En cas de nécessité, elles sont protégées du feu par une peinture intumescente, par un enduit ignifuge projeté ou encore par des panneaux isolants rapportés.

La conception de ces poutres est liée dans une certaine mesure à la réalisation de la dalle en béton armé, coulée le plus souvent sur des bacs en acier galvanisé, ou sur des prédalles en béton de faible épaisseur. En fait, la résistance ultime de ces poutres mixtes est relativement peu affectée par le mode d'exécution des dalles, mais par contre la flèche permanente sous le poids mort de la dalle dépend des conditions opératoires.

Pour éliminer ou atténuer cette flèche permanente, on peut notamment:

- étayer la poutrelle durant la prise du béton de la dalle ; après durcissement du béton et enlèvement des étais, le poids propre de l'ensemble sera reporté sur la section mixte. Un tel étayage est obligatoire dans le cas du système présenté à la figure 5e ("stub-girder").



- donner aux poutrelles en atelier une contreflèche calculée pour compenser la déformation lors du bétonnage de la dalle. Cette contreflèche est réalisée à froid (à la presse) ou à chaud (technique des "chaudes de retrait").
- assurer la continuité des poutres sur les appuis.

Parking, Helmond (NL)



La première solution donne des charges sur les étais qui peuvent être assez importantes. Elle doit être utilisée avec circonspection dans les bâtiments à étages multiples, en tenant compte de la rigidité et de la résistance des niveaux inférieurs sur lesquels les étais prennent appui à ce stade d'avancement des travaux. Des hauteurs importantes sous les poutres ou les dalles à étayer diminuent la rentabilité d'un étaielement.

A moins de prendre des dispositions particulières pour gérer les mouvements de déformation lors du bétonnage, la deuxième solution bute sur une limite pratique de quelques centimètres, qui permet encore d'assurer une pose correcte des éléments coffrant, et la correspondance des perçages dans les organes d'assemblage. Il convient aussi d'éviter une rotation néfaste ou non contrôlée engendrée dans les assemblages des solives sur les maîtresses poutres par la rotation d'appui d'une poutre contrefléchée recevant la charge de béton frais.

Durant le bétonnage de la dalle, il faut bien sûr vérifier les poutrelles au déversement, et prendre des mesures pour les maintenir en cas de besoin. Les bacs en acier correctement cloués peuvent souvent suffire.

Un étaielement des tôles ou des prédalles est nécessaire, lorsqu'elles ne peuvent porter le poids de béton frais et la surcharge due aux opérations de mise en oeuvre sur la distance séparant les poutrelles, en particulier au delà de 2,50 à 3,00 mètres. Par ailleurs, le poids de béton additionnel résultant de la déformation des supports pendant le coulage (effet de mare) n'est pas toujours négligeable.

En conséquence, les conditions de mise en oeuvre doivent être soigneusement envisagées lors des calculs, et reportées sur les documents d'exécution.



*Etaielement provisoire des tôles de grande portée lors de la prise du béton*



*Coffrage à l'aide de bacs autoportants de grande portée*



*Contreflèche des poutres: Parking du Stade, Luxembourg (L)*



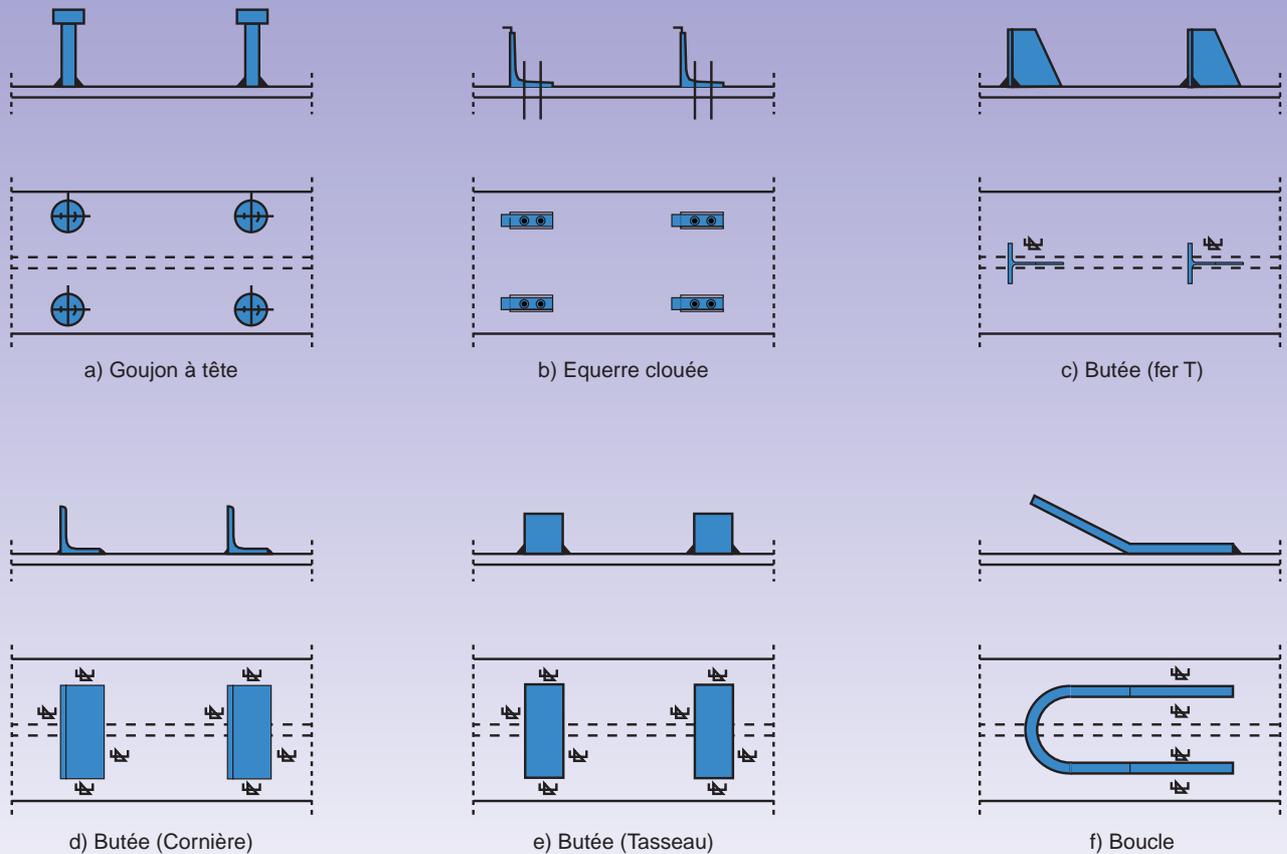
*Plancher en cours de montage, Espace Léopold, Bruxelles (B)*



## La connexion dans les poutres

La connexion mécanique de la dalle sur la poutrelle est essentielle pour garantir une collaboration en flexion. Elle est le plus souvent réalisée par soudure électrique de goujons à tête (figure 6a) à l'aide d'un pistolet adéquat. Pour la facilité du positionnement des connecteurs et de son contrôle visuel, un espacement uniforme de ces connecteurs est souhaitable. En alternative aux goujons soudés, il existe d'autres types de connecteurs, dont des étréques à clouer (figure 6b) ne nécessitant aucune soudure, mais présentant une résistance moindre, ainsi que différents types de butées (figure 6).

Figure 6: TYPES DE CONNECTEURS





Les types a et b de la figure 6 sont des connecteurs souples dans la plupart des cas, tandis que les autres modèles sont rigides. Cette différenciation est importante, car des connecteurs rigides n'autorisent pas une redistribution des efforts rasants, tandis que des connecteurs souples permettent de se limiter à une connexion partielle dans les poutres de bâtiment en raison de leur flexibilité qui permet une telle redistribution.



*Bacs en acier avec fermeture des ondes par écrasement*

Les goujons sont soudés en atelier lorsque cela est possible, par exemple sur les poutrelles où les tôles sont interrompues sans recouvrement, ou en cas d'utilisation de pré-dalles. Notons au passage que ces goujons et les surfaces métalliques en contact avec le béton ne doivent pas absolument être exempts de toute trace de peinture dans la mesure où l'adhérence béton-acier n'est pas prise en compte dans la méthode de calcul.

Sur chantier, pour les épaisseurs de tôles et de zinc usuelles, les goujons à tête peuvent être soudés à travers les tôles profilées, en prenant certaines précautions. Celles-ci sont



*Bacs en acier avec découpes circulaires*

relatives aux conditions de contact, d'humidité, de propreté des surfaces, et à l'absence de peinture, obtenue par exemple par la mise en place d'une bande adhésive avant projection de la peinture en atelier. Cette opération de soudage à travers les bacs sur chantier est devenue tout à fait courante, avec un équipement de soudage adéquat.

Sur chantier comme en atelier un test simple de pliage réalisé sur quelques goujons soudés permet de contrôler rapidement la qualité de la soudure.

Quelquefois, pour éviter le soudage de goujons sur chantier, les tôles sont livrées avec des découpes circulaires correspondant à la position des goujons soudés en atelier. Cela requiert bien sûr la confection de plans de calepinage très précis, et il faut compter avec quelques corrections inévitables à effectuer sur chantier.



*Soudage de goujons sur chantier à travers les bacs en acier*

## Calcul des poutres mixtes

### Résistance aux états limites ultimes

Suivant l'Eurocode 4, la résistance des sections transversales d'une poutre mixte aux états limites ultimes doit être vérifiée pour toute section critique de la poutre, qu'elle soit simplement appuyée sur deux appuis, ou continue sur plusieurs appuis. Hormis certains cas plus complexes de continuité et de redistribution des moments (couverts aussi par cette norme), cela conduit le plus souvent à une simple vérification du moment plastique ultime dans une ou deux sections critiques, pour les poutres mixtes réalisées à partir de profilés laminés.

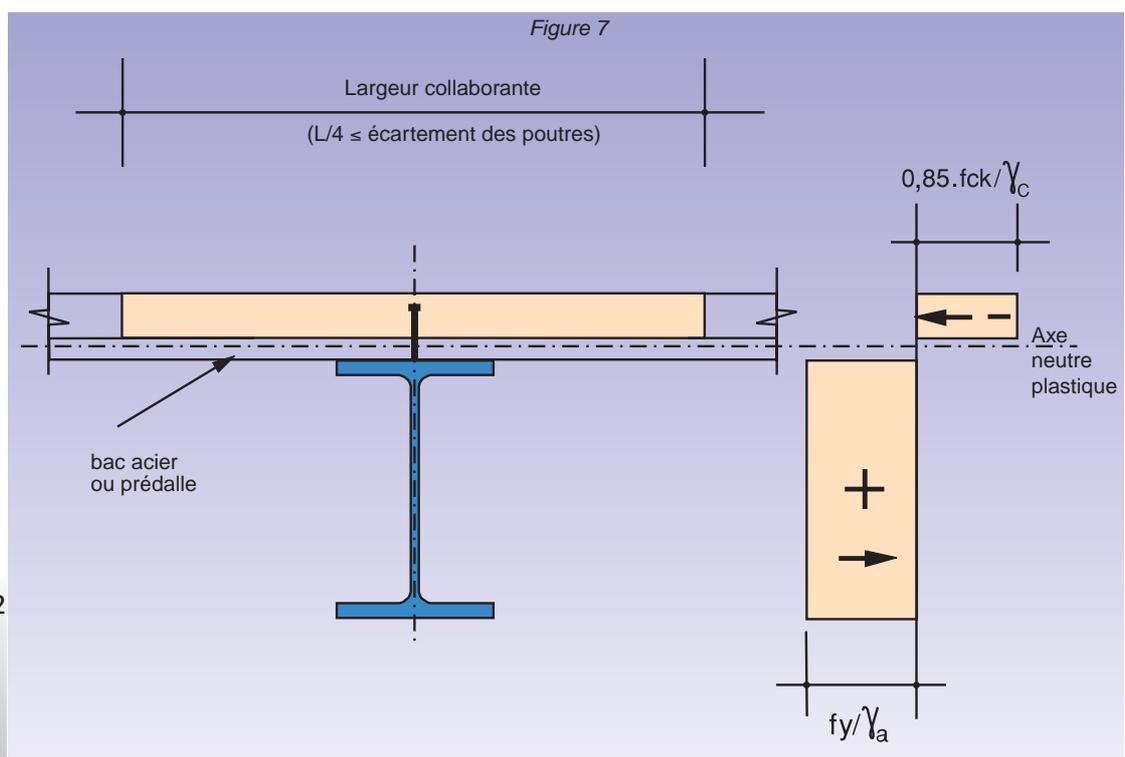
Dans le cas courant d'une poutre simplement appuyée à ses extrémités et chargée de manière uniforme, il suffit en pratique de vérifier que le moment pondéré appliqué  $M_{sd}$  reste inférieur au moment ultime résistant  $M_{pl,Rd}$ . Celui-ci est calculé suivant le schéma classique de la figure 7 avec des diagrammes rectan-



Parlement Européen, Luxembourg (L)

gulaires de contraintes. Dans ce calcul on ne prend pas en compte le béton situé au niveau du bac acier transversal ou sur la hauteur du joint sec dans la prédalle.

L'effort tranchant est supposé repris entièrement par l'âme du profilé métallique. La résistance ultime à l'effort tranchant doit être supérieure à la valeur pondérée agissante. Une interaction est à prendre en compte entre flexion et effort tranchant dans les zones d'appui des poutres continues ou dans les zones d'action de charges concentrées, si l'effort tranchant atteint la moitié de la résistance ultime de l'âme.



## Etats limites de service

Il convient de vérifier les flèches, la fissuration du béton, et la fréquence propre de vibration. On vérifiera en outre que les contraintes réelles de service n'engendrent aucune plastification locale qui invaliderait les calculs effectués suivant la théorie de l'élasticité.

Les flèches dépendent du mode de construction. Selon que la poutrelle et la dalle sont étayées ou non, le poids propre de béton frais de la dalle déformera la section mixte complète, ou le seul profilé métallique moins rigide. Ce calcul détermine la contreflèche éventuelle à donner à la poutrelle en atelier. Il est basé sur les méthodes habituelles de l'élasticité, transformant le béton collaborant de la dalle en une section d'acier équivalente par le biais du rapport des modules d'élasticité des deux matériaux. Il doit tenir compte du fluage du béton sous les charges de longue durée, du retrait du béton, et éventuellement aussi de l'effet majorateur d'une connexion partielle.

Le contrôle de l'ouverture des fissures dans le béton est à faire lorsque le béton peut être mis en traction, dans les continuités de poutre sur appuis. Il détermine un pourcentage minimum d'armatures longitudinales dans la dalle, qui ne peut de toute façon descendre en dessous de 0,4 % ou de 0,2 %, suivant que la poutre est étayée ou non en phase de construction.

Dans la plupart des cas où des personnes se déplacent normalement sur les planchers, les normes recommandent une rigidité telle que la fréquence propre fondamentale soit supérieure à 3 Hz. Cette vérification est assez simple par le biais d'une formule faisant intervenir la portée, la masse et la rigidité EI.

## Connexion

Des connecteurs et des armatures transversales sont à prévoir au-dessus de la poutre afin de transmettre l'effort de cisaillement longitudinal entre la dalle et la poutrelle à l'état limite ultime, en négligeant l'adhérence naturelle entre acier et béton.



*Poutrelles munies de connecteurs*

Les goujons à tête courants sont généralement ductiles, offrant une capacité de déformation suffisante pour un comportement plastique de la connexion et autorisant une connexion partielle. On parle de connexion partielle lorsque la résistance ultime de la poutre mixte est limitée par la résistance de la liaison acier-béton. Autrement dit, il est possible de diminuer le nombre de connecteurs dans certaines limites lorsqu'une réserve de résistance plastique est disponible, ce qui est souvent le cas.



*Hôtel des Arts et Tour Mapfre  
(immeubles de bureaux), Barcelone (E)*

## Les poutres mixtes partiellement enrobées

On augmente considérablement la résistance au feu d'une poutre mixte classique en remplissant de béton armé les chambres de la poutrelle (figure 8). Cette opération n'est possible en pratique qu'à partir d'une largeur de profilé de 180 à 200 mm, permettant encore la pose d'étriers dans le béton avec un recouvrement suffisant.

La structure est certes alourdie par le poids du béton qu'il convient de prendre en compte dans les calculs, mais cette surcharge pondérale est le plus souvent compensée par l'accroissement de rigidité de la poutre, et ne conduit pas à changer le profilé qu'une poutre mixte non enrobée aurait requis, à moins que celui-ci ne soit trop étroit pour être rempli de béton.

Avant montage, on procède au remplissage des poutrelles au sol. Celles-ci sont disposées sur des traverses rigides et bien alignées, dont l'espacement n'est pas trop grand pour éviter une déformation des profilés sous le poids de béton frais. Les paniers d'armatures préfabriqués sont déposés dans la chambre,

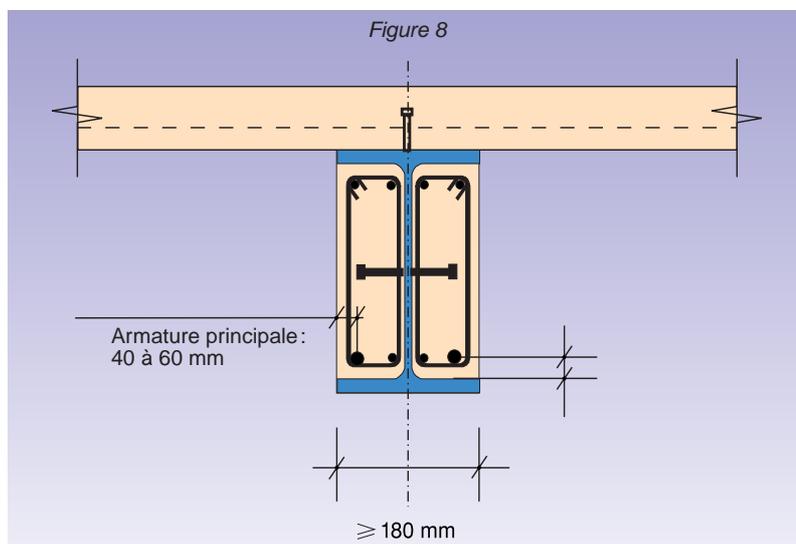


Bétonnage au sol de poutres mixtes

positionnés et maintenus en place pour garantir les recouvrements de béton prévus. Le coulage du béton est effectué si possible directement du camion malaxeur dans les poutres préparées. Celles-ci seront retournées après un délai très court pour renouveler l'opération sur l'autre face.

Ce bétonnage au sol demande donc une livraison des pièces métalliques parachevées une semaine environ avant leur montage. Il requiert la disponibilité d'une aire de travail accessible à un engin de manutention, aire qui est souvent aménagée sur le chantier, ou parfois dans un atelier ou dans un dépôt d'entreprise.

Les armatures principales de résistance au feu qui sont ajoutées dans les chambres des poutrelles doivent être complétées par des barres constructives, et surtout par des étriers dont le rôle essentiel est d'empêcher, en cas d'incendie, un éclatement local du béton, qui provoquerait un échauffement prématuré du cœur de la poutre à cet endroit.





*Musée "Museum für Verkehr und Technik", Berlin (D)*

Les blocs de béton armé dans les chambres doivent être ancrés mécaniquement à l'âme de la poutrelle, pour éviter que les contraintes thermiques ne les désolidarisent de l'acier et ne les fassent sortir des chambres. Différentes techniques sont proposées dans l'Eurocode 4 : on peut souder des goujons à tête sur l'âme, ou bien prévoir des barres traversant l'âme, ou encore souder les étriers sur l'âme du profilé.

En principe, les surfaces en contact avec le béton ne sont pas peintes, à l'exception éventuellement d'un retour de 3cm vers l'intérieur des ailes. Il faut noter toutefois que la présence de peinture sur l'âme et sur les goujons ne nuit nullement au comportement des poutres, puisque, encore une fois, l'adhérence naturelle entre béton et acier n'est pas prise en compte dans les calculs.

## Calcul des poutres prébétonnées

### Calcul en service normal

Les poutres bétonnées entre les ailes sont souvent calculées en service normal comme des poutres mixtes classiques. Le béton armé situé entre les ailes est pris en compte comme charge permanente, mais complètement négligé dans les calculs de la résistance, voire même dans le calcul des flèches.

Cette manière simplifiée de procéder est sécuritaire, l'Eurocode 4 dans sa version initiale ne donnant aucune règle spécifique pour les poutres remplies de béton. C'est la durée de résistance au feu requise qui détermine ensuite la section des armatures à placer dans le béton des chambres.

En réalité, le gain de rigidité résultant de la présence du béton et des armatures entre les ailes peut être appréciable. De quelques pourcents pour les plus petites poutrelles utilisables, il dépasse 20% pour les plus grandes au stade final, et n'est pas à négliger en phase de coulage de la dalle.

Une évaluation précise de la rigidité pour les calculs de flèche est assez fastidieuse. Elle requiert plusieurs analyses élastiques de la section pour les différentes étapes de la construction et de la mise en charge progressive de la poutre, compte tenu de l'évolution de la section portante et des caractéristiques du béton en fonction de son âge et de son retrait.

Si le béton armé des chambres n'a pas été pris en compte dans les calculs d'inertie, il faut être conscient cependant que les flèches réelles seront inférieures aux valeurs calculées, au stade final comme en phase intermédiaire de chantier. Ce fait ne doit pas être oublié lorsque les contreflèches sont définies, et lorsqu'il est nécessaire de préciser les flèches dans les stades intermédiaires, par exemple pour déterminer les capacités de réglage à prévoir lors de la pose d'éléments préfabriqués (escaliers, façades).

### Eurocode 4 (ENV 1994-1-1) Annexe G

Les essais ont démontré que le béton armé situé entre les ailes augmente non seulement la rigidité de la poutre, mais aussi sa résistance ultime en flexion et à l'effort tranchant.

L'Annexe G de l'Eurocode 4 propose des règles supplémentaires autorisant une prise en compte de ce béton armé dans les calculs en service normal. Le cas de poutres sans dalle collaborante est couvert également.

Une simplification des calculs d'inertie est proposée dans cette annexe, en partant de la position de l'axe neutre plastique, et en négligeant les zones de béton tendu.

Un béton usuel de qualité relativement modeste (C20) est généralement choisi pour le remplissage des chambres de poutres.

*Siège de l'entreprise de construction SKANSKA, Göteborg (S)*



## Vérification de la résistance au feu des poutres partiellement enrobées

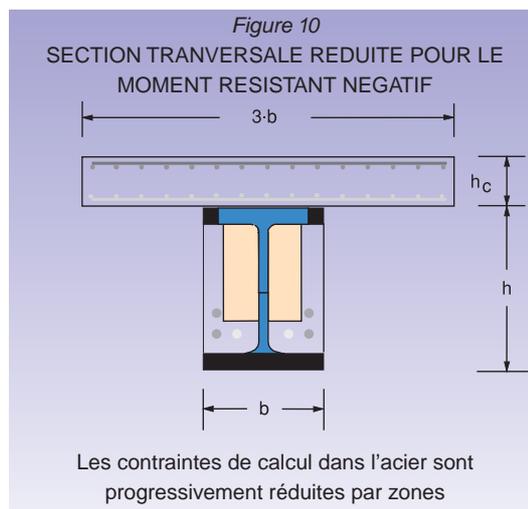
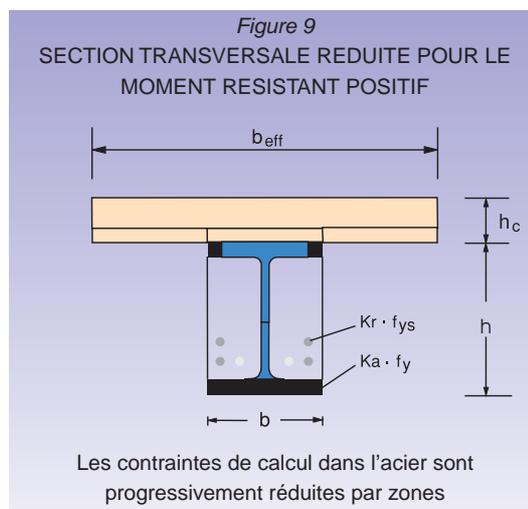
### Résistance au feu ISO

La partie 1-2 de l'Eurocode 4 propose deux méthodes de justification de la résistance au feu ISO de poutres partiellement enrobées. La première, dite méthode des valeurs tabulées, nécessite des calculs de résistance et quelques interpolations. Elle est très sécuritaire, et conduit à des sections d'armatures très élevées. Aussi, la deuxième méthode dite "méthode de calcul simplifiée" lui sera idéalement préférée.

Lors d'un essai au feu, la progression de l'échauffement dans la section peut être mesurée. Elle définit pour chaque matériau différentes zones dans lesquelles on peut évaluer la perte de résistance liée à la température atteinte.

Dans la méthode simplifiée de calcul au feu, un moment résistant ultime est calculé en découpant la section en différentes zones. Les propriétés mécaniques des matériaux sont affectées d'un facteur de réduction dépendant de la température moyenne approchée de chaque zone après une exposition au feu ISO correspondant au temps de résistance requis.

Cette méthode est définie aussi bien pour des moments positifs (figure 9) que pour des moments négatifs sur appui (figure 10). Bien que simple, son utilisation en calcul manuel demande un certain temps. Elle a été programmée, et un logiciel est disponible sur demande au service d'Assistance Technique de Arcelor Sections Commercial.



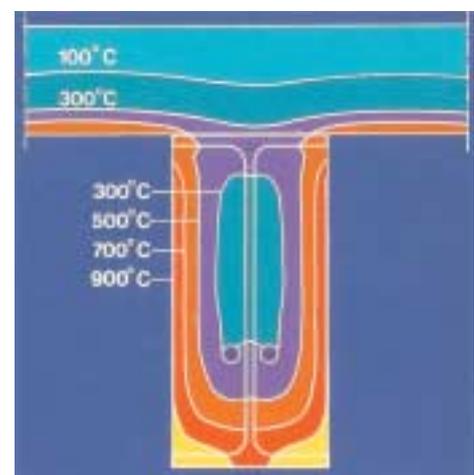


Musée "Landesmuseum", Mannheim (D)

La résistance au feu est assurée, si les moments résistants ultimes calculés pour la durée requise sont supérieurs aux moments obtenus pour les combinaisons de charges correspondant au cas accidentel d'incendie.

L'Eurocode 4 partie 1-2 autorise une redistribution des moments dans les poutres sous certaines conditions, même lorsqu'elles ont été conçues comme simplement bi-appuyées en service normal. En fait, les normes de béton armé imposent dans la dalle une section minimum d'armatures de continuité (anti-fissuration). Celles-ci resteront froides au cours d'un incendie, et limiteront la capacité de rotation de la poutre mixte. Pour pouvoir bénéficier de cette redistribution des moments, il faut en particulier que le jeu à l'about des poutres ne dépasse pas une valeur définie qui n'a rien d'exceptionnel (10 à 15 mm suivant les cas).

En pratique, on peut se passer de faire appel à une redistribution des moments dans la plupart des cas de poutres simples. Un minimum constructif de deux barres de 12 à 20 mm (suivant la poutre, §5.3.2 de ENV 1994-1-1) placées en bas des chambres de la poutrelle suffit souvent pour atteindre une résistance au feu de 90 ou 120 minutes dans les solives de plancher.

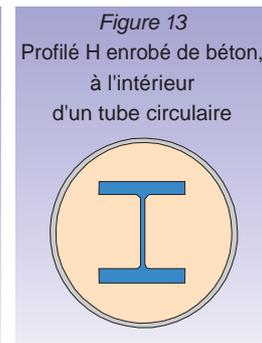
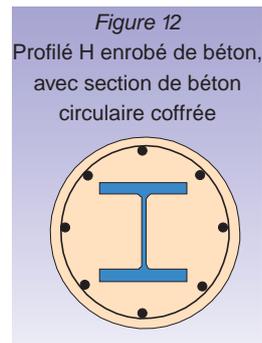
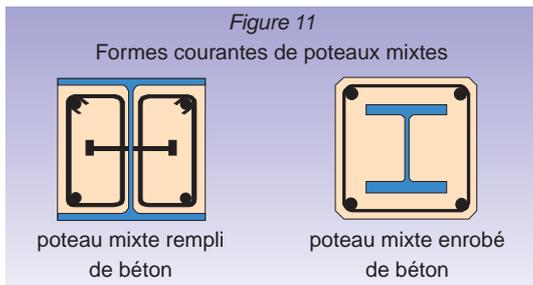


Isothermes dans une poutre partiellement enrobée soumise à un feu ISO après 90 minutes

## Types de poteaux mixtes

Les sections élémentaires de poteaux mixtes décrites sur la figure 11 sont les plus courantes. Elles présentent une section transversale carrée ou rectangulaire, et seront comparées par la suite. La section complètement enrobée peut aussi contenir deux profilés juxtaposés avec un écart suffisant permettant un remplissage correct de béton.

La section circulaire se rencontre aussi, répondant à certains critères architecturaux. Elle peut être réalisée soit par un coffrage circulaire classique (figure 12), soit en positionnant le profilé à l'intérieur d'un tube métallique (figure 13). Dans le premier cas, elle est en fait une variante sur la section complètement enrobée rectangulaire, dont elle possède les avantages et les inconvénients qui seront exposés par la suite.



Banque Bruxelles Lambert, Bruxelles (B)



Edifice Winthertur, Barcelone (E)

La section cruciforme (figure 14) fait appel à deux profilés, identiques ou non, dont l'un est découpé en deux T qui sont ensuite resoudés de part et d'autre de l'âme du second. Cette section convient pour des longueurs de flambement importantes dans les deux directions. Elle se conçoit à partir de profilés nettement plus hauts que larges, d'une hauteur généralement supérieure à 400 ou même 500 mm. Un prébétonnage au sol est possible, mais nécessite quatre opérations, et le ferrillage des chambres n'est pas très aisé.

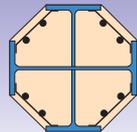


Figure 14  
Section cruciforme remplie de béton



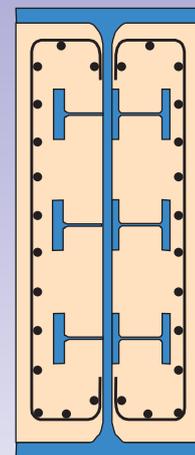
On trouve aussi d'autres types de section qui combinent deux profilés (figure 15). Dans ce cas, le grand profilé est renforcé dans chaque chambre par 1 ou plusieurs petits profilés en H ou en T à ailes épaisses, soudés sur son âme. Cet acier ajouté à l'intérieur de la masse de béton de remplissage contribue évidemment à assurer au poteau mixte une excellente résistance à l'incendie.

La présente liste des différents types de section n'est pas exhaustive, et bien d'autres combinaisons sont imaginables.



Poteaux mixtes avec renforts soudés sur l'âme

Figure 15  
Section mixte remplie de béton, avec renforts soudés sur l'âme



renforts  
avec T | avec H



Sony Center Potsdamerplatz, Berlin (D)

## Calcul des poteaux mixtes

L'Eurocode 4 propose une méthode de calcul au stade ultime des poteaux mixtes, dont la complexité n'est en fait qu'apparente et qui se programme aisément. Elle couvre les cas usuels de sections soumises à compression axiale, combinée éventuellement avec des moments de flexion additionnels.

### Charge axiale de compression

Il convient de vérifier que la charge axiale de service, pondérée par les facteurs de sécurité, reste inférieure à la résistance de l'élément mixte au stade ultime. Cette résistance ultime correspond à la résistance plastique en compression de la section transversale, diminuée par un coefficient de réduction au flambement qui dépend de l'élançement réduit du poteau (figure 16).

Figure 16

Figure 16

#### RESISTANCE PLASTIQUE A LA COMPRESSION

$$N_{pl,Rd} = A_a \frac{f_y}{\gamma_M} + A_c 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

avec:  $\gamma_{Ma} = 1,1$ ;  $\gamma_c = 1,5$  et  $\gamma_s = 1,15$

#### ELANCEMENT REDUIT

- Charge critique d'Euler

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (EI)_e}{\ell^2}$$

$\ell$  = Longueur de flambement du poteau

- L'élançement réduit est donné par la formule:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_{cr}}}$$

$N_{pl,R}$  = Résistance plastique à la compression correspondant à la valeur de  $N_{pl,Rd}$  lorsque les coefficients  $\gamma_{Ma}$ ,  $\gamma_c$  et  $\gamma_s$  sont pris égaux à 1,00

-  $\bar{\lambda} \longrightarrow \chi$  Courbes de flambement de la C.E.C.M.  
b: axe fort; c: axe faible

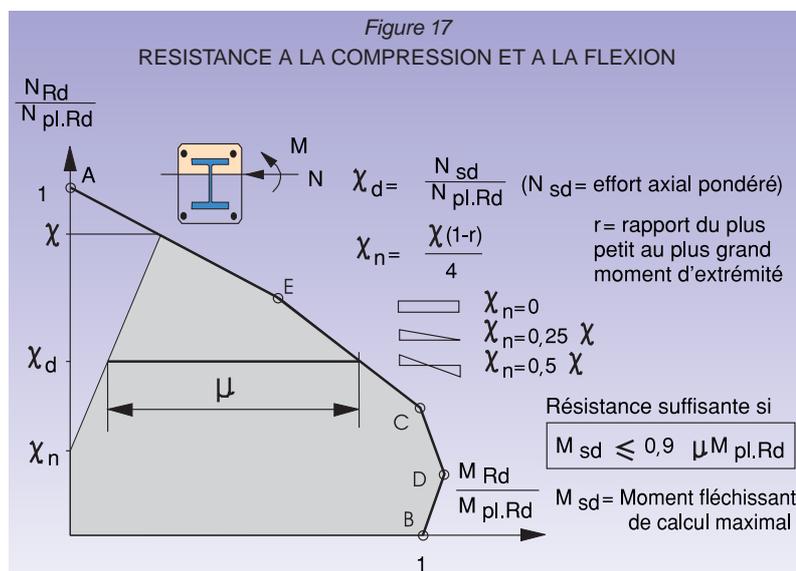
## Compression et flexion monoaxiale

Lorsque la charge axiale est accompagnée de moments de flexion agissant dans un plan, il devient nécessaire de tracer la courbe d'interaction N-M pour la section dans le plan de flexion considéré (figure 17). On vérifiera ensuite qu'au stade ultime le moment de flexion (pondéré) ne dépasse pas une limite acceptable, qui augmente lorsque le niveau de chargement axial décroît (zone grise du diagramme).

Cette courbe d'interaction peut être calculée par points successifs, en déplaçant un axe de flexion plastique à travers la section, ou en se limitant à quelques points que l'Eurocode 4 permet de déterminer assez rapidement.



Sony Center Potsdamerplatz, Berlin (D)



TAZ, une maison  
d'édition de journaux,  
Berlin (D)



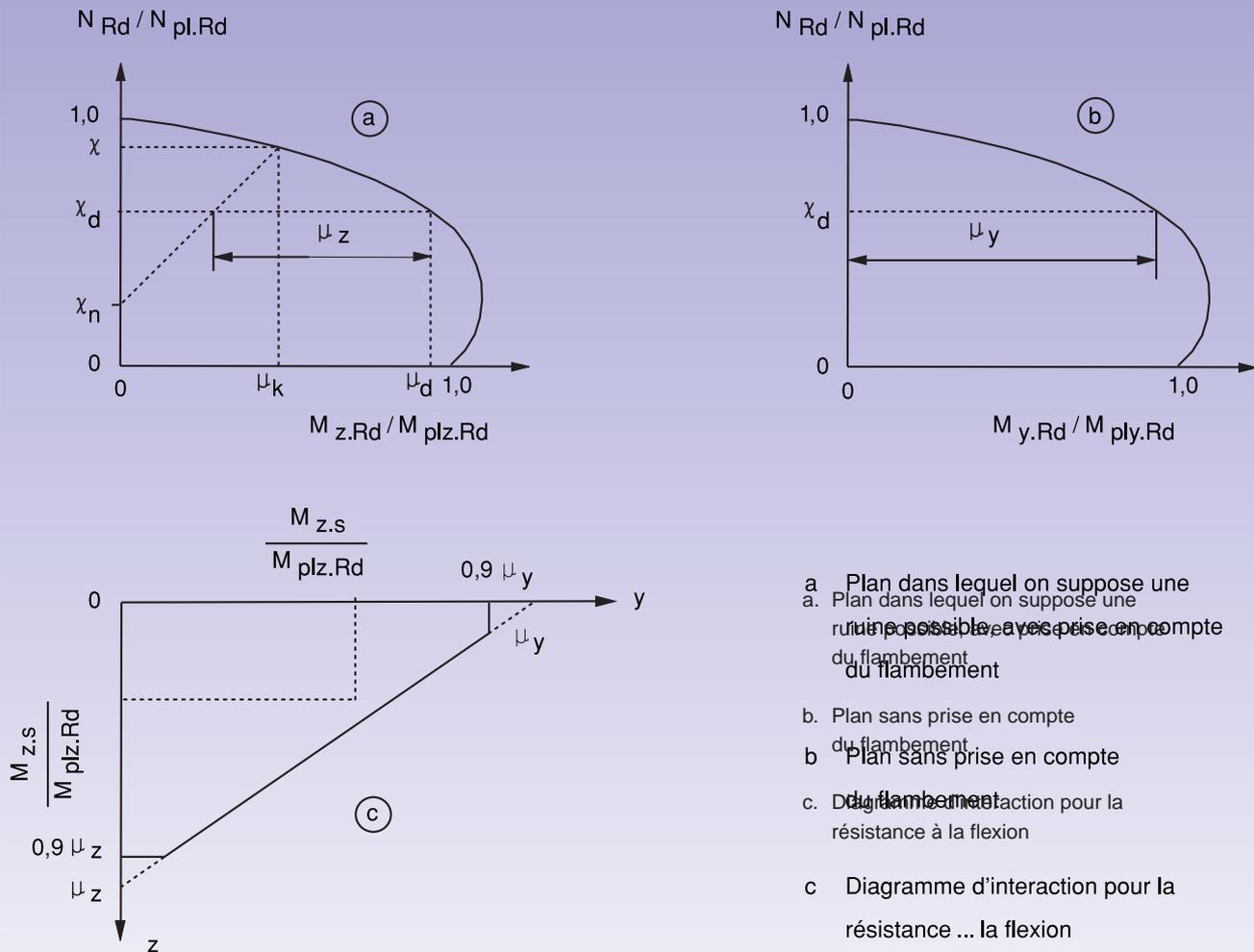
## Compression et flexion biaxiale

En cas de flexion biaxiale, la courbe d'interaction N-M doit être relevée pour les deux plans principaux de flexion. Les deux points obtenus sur les courbes dans les plans y-y et z-z sont reliés par une droite définissant avec les axes une zone à l'intérieur de laquelle doit rester la combinaison des moments pondérés agissant dans les deux plans de flexion (figure 18).

Le facteur de réduction au flambement est appliqué pour la direction jugée dangereuse, ce qui conduit en principe à considérer successivement chaque plan comme plan de ruine possible.

Figure 18

CALCUL EN COMPRESSION AVEC FLEXION BIAXIALE



## La connexion dans les poteaux mixtes

### Zones d'introduction des charges

Les charges sont rarement transmises aux poteaux par l'intermédiaire d'une plaque de tête qui les répartirait correctement entre les deux composants béton et acier du poteau. Les poutres de plancher sont le plus souvent directement attachées sur l'élément métallique du poteau. Il convient alors d'assurer la transmission à l'autre composant (le béton armé) d'une partie des charges, au prorata de sa contribution à la résistance de l'ensemble mixte.

Ce transfert s'opère sur une longueur limitée à deux fois la dimension transversale du poteau. Le plus souvent on sera amené à ajouter dans cette zone quelques connecteurs pour assurer un transfert mécanique (figure 19).



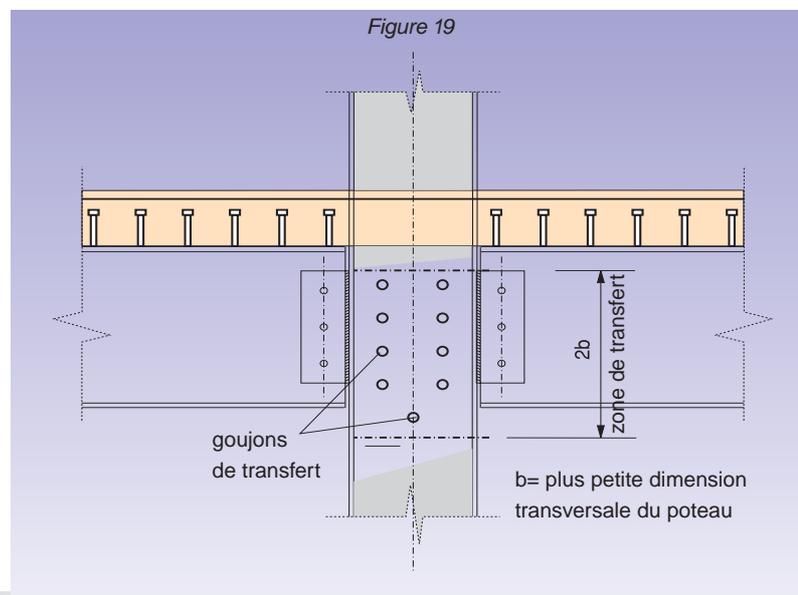
Imprimerie industrielle, Lausanne (CH)



Imprimerie industrielle, Lausanne (CH)



Parachèvement de poteaux mixtes avec des connecteurs supplémentaires dans les zones de transfert





Rembrandt Tower, Amsterdam (NL)

## Résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement doit être assurée par les contraintes d'adhérence au niveau des surfaces de contact, ou par une connexion mécanique au cisaillement interdisant tout glissement significatif.

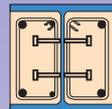
Dans le premier cas, il ne peut évidemment y avoir de peinture sur les surfaces métalliques. L'adhérence peut suffire dans le cas des poteaux à poutrelle complètement enrobée.

Par contre, les poteaux bétonnés entre les ailes doivent comporter impérativement une connexion mécanique minimale sur l'âme. Sans celle-ci, en cas d'incendie, les blocs de béton armé pourraient se désolidariser de l'âme sous l'action des contraintes thermiques, et sortir des chambres du profilé. Cette connexion mécanique peut être assurée de différentes manières, soit par des goujons soudés sur l'âme, soit par la soudure des étriers sur l'âme, ou encore par des broches traversant l'âme du profilé et liaisonnant les étriers (figure 20).



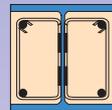
Poteau mixte, deux détails

Figure 20



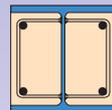
a)

a) étriers et connecteurs entrelacés

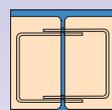


b)

b et c) étriers soudés

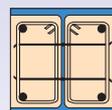


c)



d)

d) broches traversantes



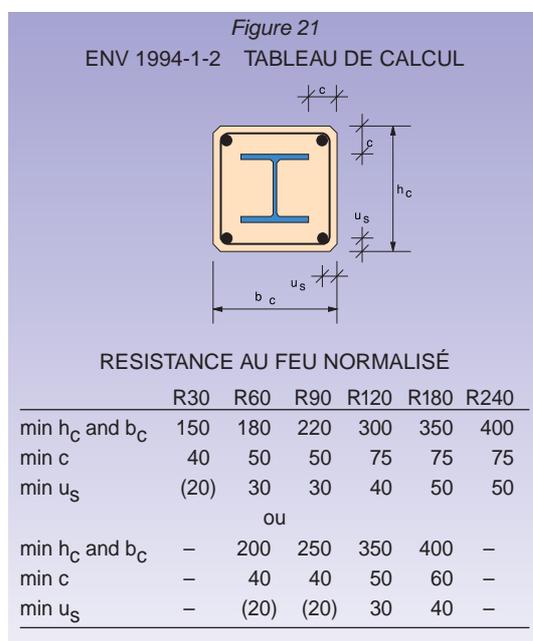
e)

e) étriers fermés et broches traversantes

## Résistance au feu des poteaux mixtes

### Les poteaux complètement enrobés

Les poteaux mixtes dont l'élément métallique est complètement enrobé de béton possèdent

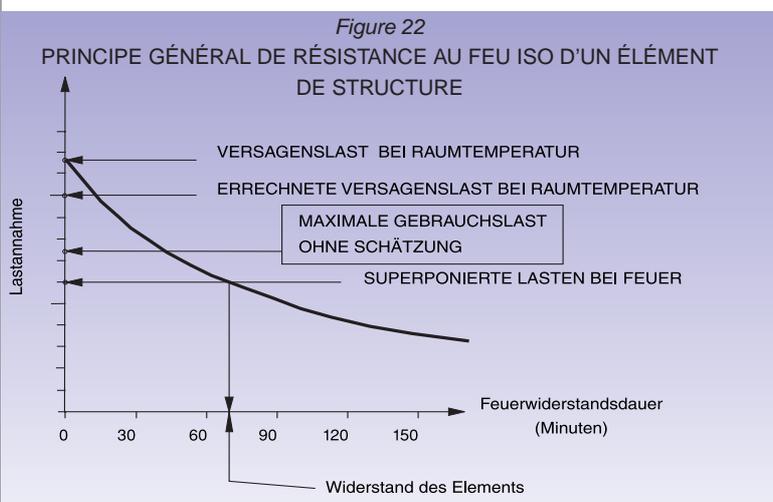


une résistance au feu structurelle très élevée. L'Eurocode 4 partie 1-2 propose un tableau très simple (figure 21) suffisant pour justifier la résistance au feu d'un poteau dans la plupart des cas pratiques sans avoir recours à des calculs. Si nécessaire, les publications mentionnées précédemment permettent une justification plus pointue.

### Les poteaux prébétonnés entre les ailes

Leur résistance au feu n'est pas automatiquement si élevée que celle des poteaux enrobés, en raison des surfaces métalliques exposées.

La figure 22 montre le principe général du comportement d'un élément de structure soumis à un incendie ISO. A partir de la charge de rupture réelle "à froid", des essais au feu sous des charges progressivement diminuées montrent des durées de résistance de plus en plus longues. A un élément de structure quelconque correspond une courbe dont la chute est d'autant plus rapide que les matériaux utilisés sont plus sensibles au feu.



Essai au feu d'un poteau mixte

Pour le niveau de charge correspondant à la combinaison des actions sous incendie cette courbe fournit la durée de résistance au feu intégrée de l'élément en question pour cette application. Cette résistance naturelle est généralement supérieure à 60 minutes pour les poteaux mixtes partiellement enrobés.

Lorsque la résistance naturelle au feu du poteau mixte n'atteint pas la durée exigée, il convient de choisir une autre section dont la courbe se trouvera plus haut sur le graphique, qui garantira la durée de résistance requise (90 ou 120 minutes) pour le niveau de charge sous incendie.

Cette procédure conduit donc en fait à surdimensionner le poteau pour le service normal. Le surcoût qui en résulte reste assez modéré pour atteindre la résistance au feu de 90 minutes (R90), à condition d'avoir logiquement choisi un profilé à ailes minces. Le surdimensionnement est obtenu de préférence par une combinaison des mesures suivantes :

- choix d'une qualité d'acier supérieure
- choix d'une qualité de béton supérieure
- section d'armatures plus importante.

Pour la dernière mesure, le taux maximum de 4 % prévu dans les normes pour le calcul en service normal peut être porté à 6 % dans le but d'assurer la résistance au feu.

Dans la plupart des cas courants de bâtiments, il est nécessaire d'augmenter aussi la taille du profilé métallique pour atteindre une résistance au feu de 2 heures (R120).

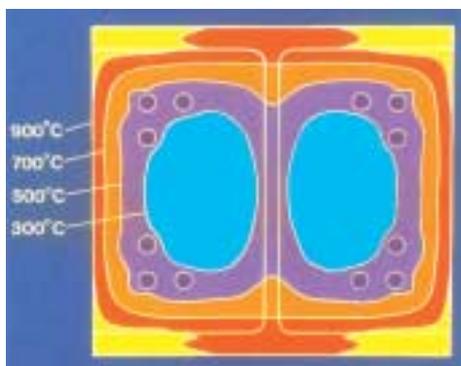
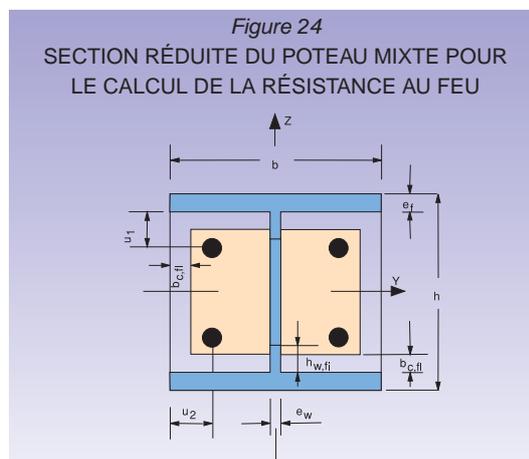


Figure 23: isothermes dans un poteau mixte soumis à un feu ISO de 90 minutes

## Vérification au feu des poteaux bétonnés entre les ailes

L'application des valeurs tabulées proposées dans l'ENV 1994-1-2 nécessite de toute manière certains calculs. Aussi, la méthode de vérification simplifiée qui est proposée dans l'Annexe F est plus usuelle en raison de sa grande diffusion sous forme d'un logiciel pratique.

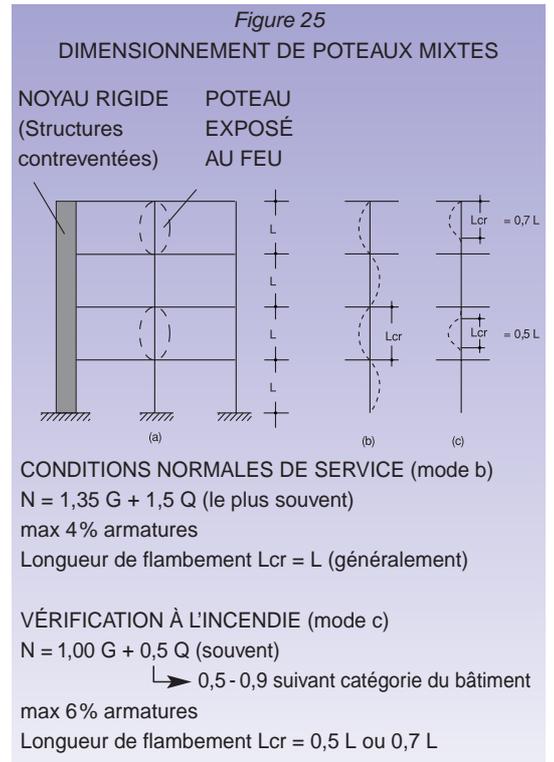
Comme pour les poutres remplies de béton, cette méthode simplifiée se base sur des mesures de champs thermiques à l'intérieur de la section après 30, 60, 90 ou 120 minutes d'incendie ISO (figure 23). A partir des isothermes on peut découper une section en zones (figure 24) dans lesquelles seront réduites progressivement les caractéristiques mécaniques des différents constituants en fonction des températures moyennes atteintes. La charge ultime est calculée ensuite par un processus semblable à celui utilisé pour le calcul de la charge ultime en service normal.



Le dimensionnement en situation d'incendie peut être déterminant pour ce type de poteau, en particulier pour des exigences de résistance supérieures à 1 heure. Il est mené pour la combinaison des actions en cas d'incendie, en adoptant si nécessaire les mesures de surdimensionnement énoncées plus haut. En outre, pour les calculs au feu, la longueur de flambement est généralement réduite (figure 25) lorsque les planchers assurent un compartimentage au feu.

### Sections cruciformes et profilés avec renforts sur l'âme

Il n'existe pas directement de méthode simplifiée pour ces sections; on doit avoir recours à la simulation numérique (CEFICOSS) ou travailler par interpolations et analogies dans les tables de la référence [2] créées à partir de simulations numériques.



TAZ, une maison d'édition de journaux, Berlin (D)

## Détails constructifs

Les deux constituants d'un élément mixte - la poutrelle métallique et le béton armé - doivent bien entendu répondre aux règles de mise en oeuvre de leur domaine respectif.

Cependant, les structures mixtes doivent surtout leur succès à leur résistance au feu, et certains détails constructifs sont importants pour garantir le bon comportement en cas d'incendie.

### Disposition des armatures

Les règles classiques du béton armé doivent être observées pour les conditions de résistance et de fissuration en service normal. Elles définissent notamment les diamètres minimum des armatures et des étriers, l'espacement des étriers, leur configuration en fonction de l'écart entre barres comprimées, les recouvrements de béton, etc...

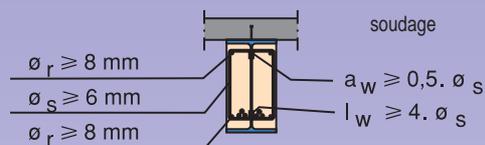
Un risque additionnel doit être pris en compte pour la situation d'incendie : l'éclatement local du béton. Même si en apparence il ne diminue que faiblement l'aire de la section résistante, ce phénomène accélère la pénétration calorifique dans la section à cet endroit, qui risque alors de devenir un point faible de la structure.

En conséquence, l'Eurocode 4 donne quelques règles additionnelles à respecter (figure 26). En particulier pour les poutres, les étriers ne peuvent être espacés de plus de 250 mm, ou les joues doivent être munies d'un treillis de peau, la couverture de béton n'excédant pas 35 mm.

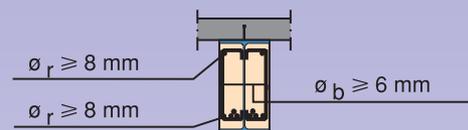


Musée "Museum für Verkehr und Technik", Berlin (D)

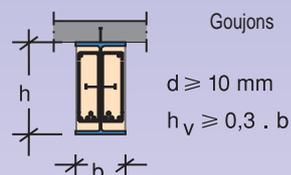
Figure 26  
DETAILS CONSTRUCTIFS



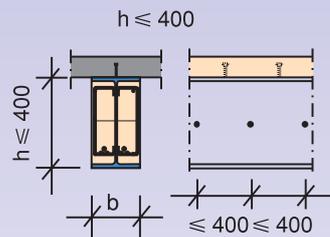
Soudage des étriers à l'âme



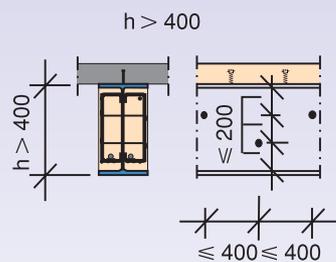
Barres traversant l'âme



Goujons



$h \leq 400$



$h > 400$

## Connexion mécanique sur l'âme

La connexion mécanique sur l'âme peut être réalisée de différentes manières, comme déjà mentionné précédemment, par soudure de goujons, par soudure des étriers ou encore en prévoyant des barres traversant l'âme du profilé et liaisonnant les paniers d'armatures. Dans le cas des poutres remplies de béton, les connecteurs doivent répondre à certaines règles d'écartement maximum et de section minimum (figure 26).

Il en va de même dans le cas des poteaux remplis entre les ailes, lorsqu'une connexion plus importante n'est pas exigée pour des raisons de cisaillement en service normal.

## Armatures continues dans les poteaux bétonnés entre les ailes

La densité d'armatures continues dans les chambres du poteau au droit des assemblages de poutres peut être gênante pour créer les réservations nécessaires au placement des boulons de montage. Il est possible d'améliorer la situation lorsque la section métallique (éventuellement renforcée) peut localement résister seule. Les armatures peuvent alors être interrompues dans cette zone moyennant un transfert de charge du béton vers l'acier qui doit être assuré au dessus de cette zone, puis inversement en dessous.



Poutre avec ouverture dans l'âme

## Ouvertures dans l'âme des poutres

Des percements dans l'âme d'une poutre remplie de béton entre les ailes sont envisageables comme pour une poutre métallique non enrobée.

Il est courant de renforcer l'ouverture par un bout de tube ou par un encadrement en tôles qui serviront en même temps de coffrage lors du remplissage des chambres (photo).

Pour autant que les armatures longitudinales dans les chambres restent relativement bien enrobées, ces ouvertures n'ont d'incidence que sur la résistance à l'effort tranchant en augmentant la pénétration calorifique dans l'âme du profilé. La réserve de capacité portante en effort tranchant de l'âme enrobée lors d'un incendie est souvent assez importante. Une évaluation approchée de la capacité résiduelle au droit de l'ouverture peut être basée sur les réductions de la limite d'élasticité de l'acier dans l'âme proposées dans la méthode simplifiée de l'Eurocode 4. Cette méthode est en principe sécuritaire, car les effets de la radiation sont en fait plus faibles dans l'ouverture.

Bien entendu, les passages de tuyauteries peuvent aussi être obturés par de l'isolant après montage des installations.



City Centre Kirchberg, Luxembourg (L)

## Choix du type de poteau mixte

### Comparaison des deux sections les plus courantes

| Poteau complètement enrobé   | Poteau prébétonné entre les ailes  |
|--|--|
|  <p>Figure 27</p>  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessité de coffrer le périmètre.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de coffrage, en principe (sauf difficultés de levage, ou nécessité d'obtenir une surface de béton très lisse ou structurée)</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bétonnage le plus souvent après montage.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bétonnage au sol, à plat, avant montage.</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de face métallique apparente.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Deux faces métalliques restent visibles.</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se conçoit de préférence avec des profilés à ailes épaisses (HEM, HEB, HD).</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se conçoit de préférence avec des profilés à ailes minces, pour réduire la section d'acier directement exposée au feu (HEAA, HEA, HP).</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le ferrailage doit être placé autour de la pièce en position finale montée.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les paniers d'armatures peuvent être pré-assemblés, et sont posés rapidement.</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le taux de ferrailage est assez faible. On évite si possible les barres situées ailleurs qu'aux coins.</li> </ul>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour des résistances au feu au delà d'une heure, on a intérêt à ferrailer au taux maximum autorisé (6 % à l'incendie, dont 4 % seulement sont pris en compte en service normal).</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aucune peinture ne doit être appliquée sur le profilé</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Une peinture, avec éventuellement une seule fonction esthétique, est généralement appliquée sur les ailes apparentes.</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Un petit nombre de connecteurs mécaniques suffit le plus souvent. Ils sont surtout requis dans les zones d'introduction des charges.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Une connexion mécanique (goujons ou autre méthode) est à prévoir sur toute la hauteur du poteau, pour éviter une désolidarisation des constituants lors d'un incendie.</li> </ul>           |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Résistance au feu structurelle automatiquement très élevée.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Résistance au feu structurelle avec surdimensionnement éventuel par rapport au service normal.</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Au chantier, la capacité de résistance reste inférieure à sa valeur finale, jusqu'à achèvement de l'enrobage.</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- En raison du surdimensionnement pour l'incendie, on bénéficie en phase chantier d'une surcapacité appréciable.</li> </ul>   |

## Les poteaux profondés

### Le principe de la méthode

Le recours aux poteaux profonds est assez fréquent en milieu urbain, car il élimine de nombreux problèmes créés par une excavation profonde à ciel ouvert au voisinage de bâtiments existants. Des poteaux d'une hauteur des sous-sols à réaliser sont descendus dans des puits forés. Leur pied est scellé dans une masse de béton armé coulée au fond des puits, au niveau de la fondation finale ou sous celle-ci. La superstructure du bâtiment est érigée ensuite sur ces poteaux reliés par un plancher de départ, tandis que simultanément on excave "en taupe" sous ce plancher les niveaux successifs en sous-sols et on réalise les structures des plateaux en sous-sols.

### La technique

Pour maintenir au flambement ces poteaux profonds en phase de chantier, les puits sont remplis de gravier, dans lequel sont intercalés éventuellement quelques bouchons de maintien en béton maigre à des niveaux préalablement définis.

La position en plan et en niveau des têtes de poteaux peut être réglée de manière assez précise sur l'aire de travail. Par contre, il est plus délicat d'ajuster la verticalité d'un poteau dans son puits, et les écarts peuvent être plus grands que dans le cas d'une construction à l'air libre. Ils peuvent être atténués toutefois à l'aide de vérins hydrauliques à action horizontale montés vers le pied de poteau et commandés depuis le sol.



*Poteaux profonds*



*Banque Bruxelles Lambert, Bruxelles (B)*



*Immeuble de bureau Woluwe Garden, Bruxelles (B)*

Un poteau métallique, léger et facile à manipuler, est idéal pour ces opérations de pose et de réglage. Cependant, les exigences de résistance au feu en sous-sols (souvent R90 ou R120) ne permettent pas de laisser un poteau métallique sans une protection additionnelle, qui n'est pas toujours bienvenue dans des locaux en grande partie réservés au stationnement de véhicules.

Un poteau mixte lui est souvent préféré pour la compacité de sa section et sa résistance au feu intégrée. Le choix entre un poteau complètement enrobé et un poteau prébétonné entre les ailes peut être guidé par les quelques considérations qui suivent.

## Poteaux complètement enrobés

Ces poteaux pourraient être entièrement préfabriqués avant la pose dans le puits, mais il est plutôt en usage d'utiliser la section métallique seule en phase chantier, alors que les sollicitations sont inférieures aux valeurs finales de service. Ils sont progressivement enrobés de béton armé à chaque niveau par la suite, au fur et à mesure de l'avancement de l'excavation et de la réalisation des planchers.

Pour cette application, ce type de poteau mixte présente les avantages et les inconvénients suivants :

- La pièce à lever est relativement légère, robuste, et ne doit pas être traitée par peinture.
- En principe, un surdimensionnement par rapport aux sollicitations en service final ne serait pas requis. Cependant, il convient de vérifier le poteau dans les différents stades de l'évolution du chantier. Un trop grand élançement ou un enrobage trop tardif du niveau le plus bas peuvent conduire à augmenter la section du profilé. Parfois le pro-

filé métallique peut suffire à lui seul au stade final de service, auquel cas le béton d'enrobage ne sera plus qu'une simple protection contre l'incendie. Il est donc important de bien évaluer les vitesses d'avancement en superstructure et en sous-sol, et d'en déduire les différentes combinaisons de charges et de longueurs de flambement à vérifier en phase de chantier.

- La section est très compacte, et peut être moulée sous différentes formes telles que carrée ou circulaire. Toutefois, des largeurs de section trop importantes (>40 cm) peuvent devenir gênantes pour disposer les places de stationnement de voitures.
- Les coffrages sont généralement réutilisables plusieurs fois. Un petit décentrement de ces coffrages par rapport au poteau métallique permet, le cas échéant, de rectifier de quelques centimètres les tolérances de pose des pièces métalliques préfondées.
- Les opérations de coffrage, de ferrailage et de mise en place du béton ne sont pas très aisées. En particulier, il faut laisser dans les planchers des ouvertures ou des conduits permettant par la suite l'introduction du béton dans le coffrage du poteau du niveau inférieur, tout en assurant un remplissage correct et une transmission locale des charges. D'autre part, les jonctions par recouvrement longitudinal des barres d'armature imposent de prolonger celles-ci vers le bas dans une fosse remplie de sable, pour les retrouver en attente supérieure pour le poteau suivant de l'étage sous-jacent.



*Poteau préfondé en cours de montage*

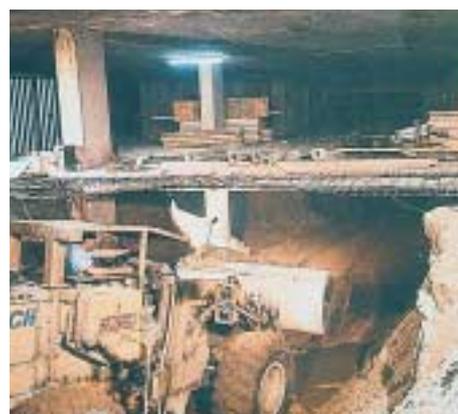
*Immeuble Kö-Galerie, Düsseldorf (D)*

## Poteaux prébétonnés entre les ailes

Ces poteaux sont remplis de béton armé sur le sol avant d'être descendus dans les puits forés. Ils présentent les particularités suivantes :

- Il faut disposer d'une aire de bétonnage, et les pièces à lever sont assez lourdes. Des longueurs de poteaux trop importantes peuvent cependant être réalisées en plusieurs tronçons qui sont boulonnés bout à bout lors de la descente dans les puits. Les joints d'assemblage sont localisés dans l'épaisseur des dalles de plancher, et donc invisibles par la suite, ce qui permet de les concevoir avec plaques d'about et boulons extérieurs. Des blocages horizontaux au flambement sont à prévoir dans les puits en fonction de l'emplacement des joints.
- Le dimensionnement à l'incendie conduit souvent à une surcapacité de résistance pour le service normal, qui est directement utilisable en phase chantier pour augmenter la longueur de flambement autorisée, et effectuer le terrassement et le montage des planchers sur plusieurs niveaux.
- Comme la largeur des profilés laminés utilisables varie de 300 à 400 mm environ, ce type de poteau mixte convient bien pour augmenter la surface utile en sous-sols en se logeant entre les places de stationnement de voitures.

*Immeuble Kö-Galerie,  
Düsseldorf (D)*



## Planchers

Les poteaux préfondés métalliques ou mixtes se marient avec tout type de structure de plancher. Lorsque la manutention de poutres est possible, celles-ci peuvent être aussi des poutres mixtes, remplies entre les ailes ou protégées du feu. Tous les organes d'assemblage et les réservations pour le passage d'armatures peuvent être prévus assez facilement dans les poteaux. On garde dans ces assemblages une possibilité de compenser les différences de distances dues aux écarts de verticalité des poteaux.

L'ossature de poutres du plancher est utilisable pour stabiliser les parois moulées en phase de chantier, et le remplissage de ces poutres entre les ailes leur confère une résistance accrue au flambement.

Notons encore que l'utilisation de bacs en acier galvanisé pour le coffrage des planchers ne nécessite pratiquement aucun engin de manutention en sous-sol, et complète idéalement le poutrellage métallique.



Poteau avec tasseaux  
avant montage



## Les assemblages

Les assemblages se font presque toujours par les constituants métalliques des pièces mixtes. Ils répondent aux règles usuelles de la construction métallique.

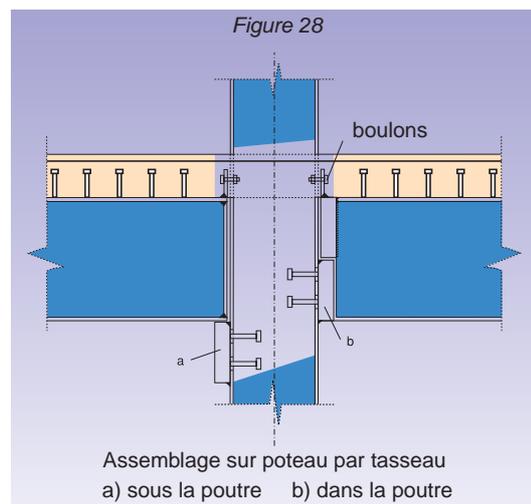
Leur conception est guidée par l'idée directrice de placer les boulons ou cordons de soudure à des endroits abrités de l'action directe du feu, tout en conservant une accessibilité suffisante lors du montage et en réduisant autant que possible les opérations ultérieures destinées à en assurer la protection ou l'enrobage.

Par exemple, des boulons disposés dans l'épaisseur de la dalle en béton et de la chape de finition seront noyés dans la masse de béton et protégés sans aucune opération supplémentaire spécifique.

Ces considérations ont conduit à quelques types d'assemblages particuliers, devenus assez communs :

### Assemblages poutres sur poteaux

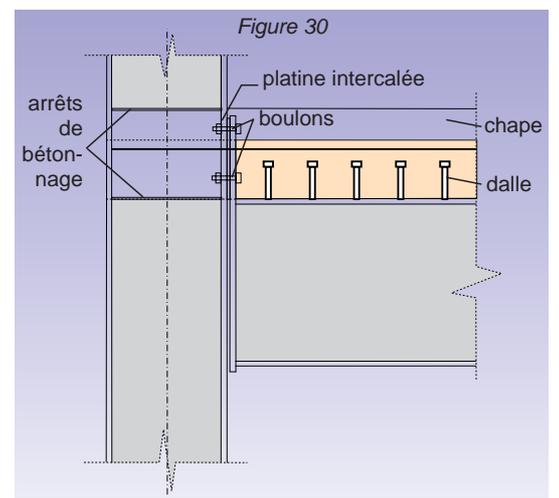
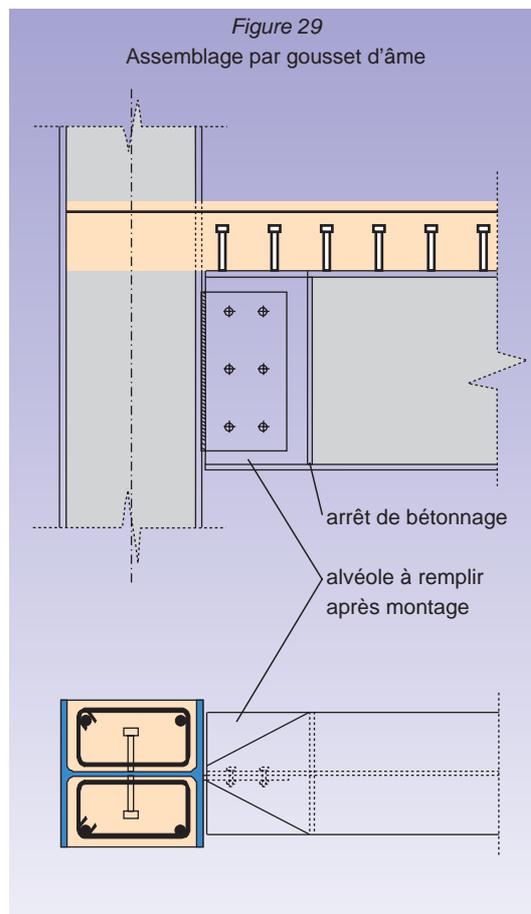
- **par tasseau** (figure 28) : le tasseau peut se trouver sous la poutre ou dans la hauteur de poutre. Une liaison de montage est ajoutée dans l'épaisseur de la dalle. S'il est assez épais, le tasseau ne doit pas être protégé du feu à condition de renforcer le cordon de soudure supérieur non exposé à la radiation d'un incendie, ou de le munir de goujons pénétrant dans le béton intérieur du poteau à travers des perçages pratiqués dans l'aile. En service normal, ces goujons assureront une répartition des charges introduites dans le poteau entre les constituants, et ils compenseront la perte de résistance des soudures en cas d'incendie.



Assemblage sur tasseaux

- **par gousset d'âme** (figure 29): l'assemblage boulonné doit être protégé du feu après montage, par des matériaux isolants ou par un remplissage au béton. Cette dernière opération est facilitée par les coupes obliques de l'aile supérieure du profilé permettant un remplissage de la cavité lors du coulage de la dalle.

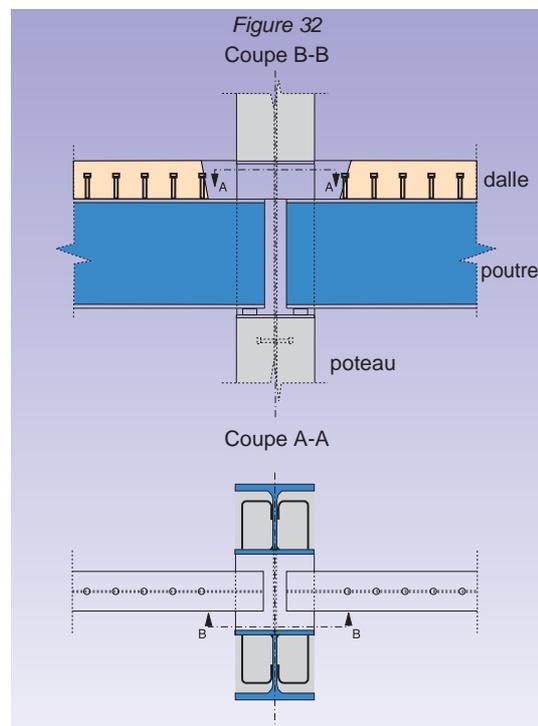
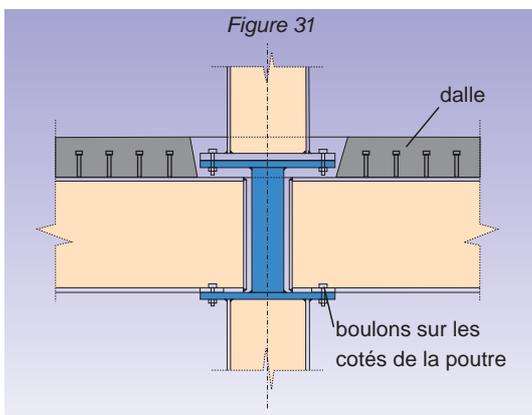
- **par platine d'about et boulons supérieurs** (figure 30): lorsque cela est possible, on peut concentrer des boulons dans l'épaisseur de la dalle, ou au moins en nombre et diamètre suffisants pour garantir la résistance ultime pour la situation accidentelle d'incendie sous la combinaison d'actions correspondante. Une platine d'écartement peut être intercalée pour laisser libre la rotation d'appui.



Assemblage par gousset d'âme

- **par appui direct dans les poteaux** (figure 31): cette disposition a été utilisée pour des poteaux préfabriqués de section importante, qui sont interrompus à chaque niveau. La transmission des charges exige des plaques d'about épaisses et des pièces massives en acier incorporées dans la traversée des planchers.

Les poteaux prébétonnés de grande dimension (sous-sols de bâtiments à étages) peuvent comporter des ouvertures dans l'âme au niveau des planchers pour recevoir les poutres, avec une possibilité de réglage utilisable en système préfondé pour compenser les défauts de verticalité (figure 32).



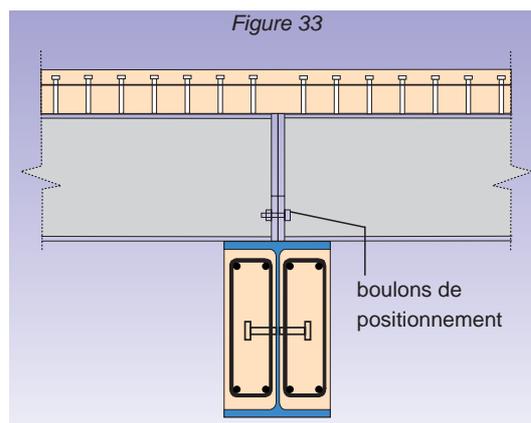
*Siège des P&T, Saarbrücken (D)*



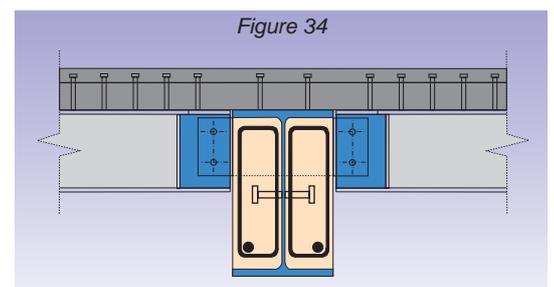
*Poteaux prébotonnés avec ouvertures dans l'âme pour recevoir les poutres de plancher*

## Assemblages poutres sur poutres

- **par appui direct** (figure 33): cette solution très simple conduit à une hauteur de plancher assez importante, qui laisse cependant beaucoup de liberté pour la disposition des équipements techniques. Un plat de continuité peut être soudé sur les ailes des solives après montage. Les boulons de positionnement peuvent bien sûr rester sans protection incendie. L'aile supérieure du sommier non connectée à une dalle peut recevoir une plaque d'isolant pour augmenter sa résistance au feu en diminuant la section d'armatures dans les chambres.



- **par gousset d'âme** (figure 34): un gousset sort du béton des chambres du sommier et reçoit l'âme de la solive qui n'a pas été pré-bétonnée jusqu'à son extrémité. Ce gousset ne gêne pas le ferrillage du sommier s'il n'est pas prolongé trop bas vers l'aile inférieure; il suffira de couper à cet endroit les barres constructives supérieures des papiers d'armatures préassemblés au moment de les poser dans les chambres.

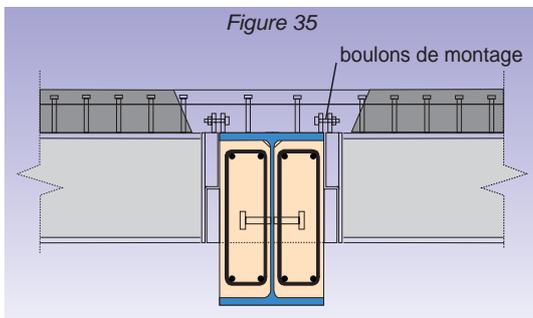


38

Assemblage poutres sur poutre



Siège des P&T, Saarbrücken (D)



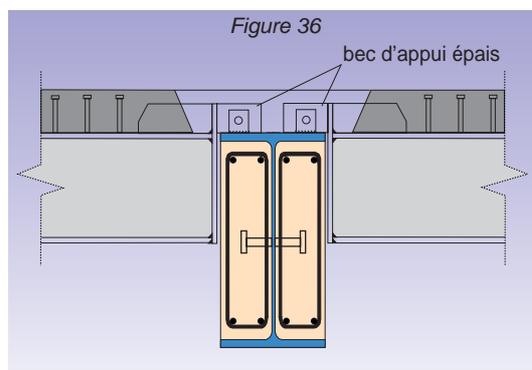
Comme dans le cas d'un assemblage sur poteau, il faudra refermer ou protéger la zone des boulons après le montage.

- **par tasseau** (figure 35): comme dans le cas d'une liaison sur poteau, un accrochage sur tasseau avec une attache supérieure de montage est possible. Cependant, s'il est situé trop bas dans le sommier, sa fixation peut gêner la pose des armatures principales du sommier, qui doit alors être prévue en atelier.

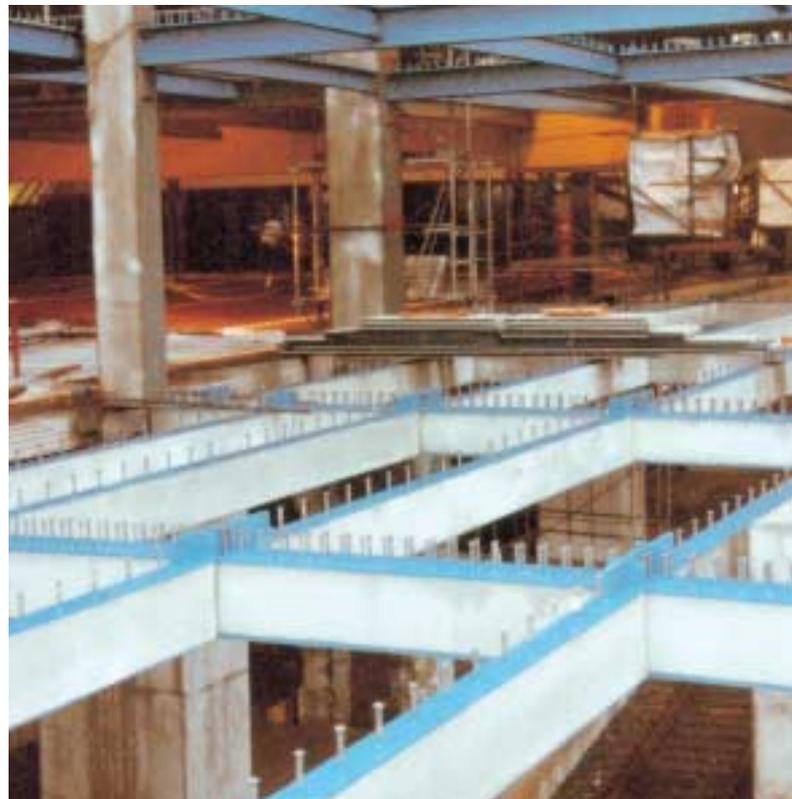


Assemblage poutre dans poutre par tasseaux

- **par bec d'appui supérieur** (figure 36): une pièce métallique de forte épaisseur est soudée sur l'aile supérieure de la solive, et repose simplement sur le sommier avec un boulon de positionnement. Cette solution très répandue permet de remplir complètement toutes les pièces, et ne crée aucune entrave pour la disposition des armatures dans les chambres.



*Poutre prébétonnée avec bec d'appui supérieur avant montage*



*Assemblages de poutres prébétonnées avec bec d'appui supérieur dans la dalle*

## Stabilité d'ensemble des structures

### Effet diaphragme des dalles

Le monolithisme et la rigidité dans leur plan des dalles de plancher en béton permettent de les utiliser comme organe de transfert des actions horizontales vers les éléments assurant la stabilité verticale. Il reste cependant à stabiliser suffisamment les structures en phase chantier, pendant le bétonnage des dalles.

### Contreventements verticaux

Des diagonales de contreventement ont été réalisées en section mixte, mais les assemblages aux noeuds ne sont pas de conception facile.

Diverses solutions sont plus courantes :

- on ajoute des palées de stabilité non protégées du feu, de manière qu'il s'en trouve toujours une en dehors du compartiment subissant l'incendie.
- on dispose le contreventement derrière un mur le protégeant des flammes.
- on scelle après montage un contreventement métallique simple à l'intérieur d'un voile en béton coulé entre les poteaux, ou englobant ceux-ci dans le voile.
- on s'appuie sur des voiles en béton ou des noyaux stables au feu, à condition que ces éléments soient déjà disponibles au démarrage des opérations de montage.



*Sony Center Potsdamerplatz, Berlin (D)*

## Modèles statiques

Le modèle statique adopté en service normal peut évoluer en situation d'incendie, en fonction des détails constructifs adoptés.

Voici quelques exemples :

- Une poutre isostatique en service normal bénéficie d'un effet de continuité favorable sous incendie. La présence des armatures de continuité dans la dalle au-dessus des appuis limite la capacité de rotation sur appui de la poutre soumise au feu.
- Des assemblages rigides en service normal restent rigides ou évoluent vers une articulation simple sous incendie, suivant le signe du moment de flexion les sollicitant, lorsque les boulons inférieurs ne sont pas protégés du feu. Il faut cependant que les boulons supérieurs protégés dans la dalle puissent assumer seuls le transfert de charge au poteau en situation accidentelle d'incendie.
- Lorsque la dalle est plutôt épaisse (pour des raisons d'isolation phonique, par exemple) et que les solives ne sont pas très espacées (pour éviter un étayage lors du bétonnage, par exemple), on peut envisager de ne donner une résistance au feu qu'à une solive sur deux. Il faut alors vérifier la dalle pour la **double portée en situation incendie**, et l'armer en conséquence. La poutre résistante doit aussi être vérifiée au feu dans une situation correspondant au double espace pour la combinaison de charges correspondant à ce cas accidentel d'incendie.

En résumé, il convient de vérifier les structures dans les deux situations de service normal et d'incendie avec leurs combinaisons d'action respectives, mais aussi avec un modèle statique qui peut être différent d'une situation à l'autre.

## Joint de dilatation

Moyennant certaines précautions au niveau du ferrailage des dalles, des surfaces de bâtiments dépassant 6000m<sup>2</sup> et atteignant 120 m de longueur ont été réalisées en structures mixtes sans joints de dilatation. Il est cependant plus courant de respecter les distances usuelles de la construction métallique pour la disposition des joints dans la structure poteaux-poutres, tandis que des joints intermédiaires dans le béton armé des dalles de plancher sont ajoutés avec des espacements correspondant aux normes du béton armé.



*Sony Center Potsdamerplatz, Berlin (D)*

## Intégrité structurelle

L'intégrité structurelle et la robustesse d'une ossature de bâtiment constituent une exigence fondamentale formulée comme un principe de base dans les Eurocodes. Selon ce principe, une action accidentelle (explosion, choc, ...) ne doit pas endommager une structure dans une mesure disproportionnée par rapport à la cause d'origine.

Pour assurer cette intégrité, une mesure essentielle consiste à liasonner horizontalement les éléments entre eux, en donnant à tous les assemblages une résistance suffisante à des sollicitations de traction horizontales. Certains pays comme le Royaume Uni ont défini dans une annexe au Document d'Application National des Eurocodes les niveaux de résistance à atteindre dans ce but.

Une construction métallique répond très bien à cette exigence fondamentale, de par la résistance à la traction naturelle de ses constituants et de ses assemblages classiques. Cependant, en construction mixte, certains types d'assemblages sur tasseau doivent être vérifiés par rapport à cette exigence. Il convient en effet de ne pas réduire exagérément le nombre et le diamètre des boulons de montage, à moins d'en compenser la faible résistance par des barres de traction additionnelles correctement ancrées dans les dalles.

*Parlement Européen Espace Léopold, Bruxelles (B)*



## Assistance technique

Arcelor Sections Commercial propose un service gratuit d'assistance technique pour tous les aspects touchant à l'utilisation des profilés laminés : conception, réalisation, métallurgie, techniques de soudage, traitement de surface et résistance au feu. Ses ingénieurs sont prêts à mettre au point des solutions optimales, et ce en étroite collaboration avec tous les intervenants du projet qui leur sera soumis.

## Documents d'information disponibles

- Programme de vente Poutrelles, Profilés U et Cornières
- HISTAR - La nouvelle génération de poutrelles laminées pour une construction métallique économique
- Parachèvement
- Les parkings en construction métallique
- Treillis
- Ponts en profilés laminés
- High-rise buildings (en anglais)

## Références des photos

- Bauen mit Stahl
- Stahl information Zentrum
- Staalbouw instituut
- v. BUYCK N.V.
- DYNABAT S.A.
- ECCS

Le contenu de cette brochure a été établi avec soin. Toutefois la responsabilité de Arcelor Sections Commercial ne peut être engagée en aucune façon pour d'éventuelles informations inexactes et pour les dommages que leur emploi pourrait entraîner.

CERTIFICATION **ISO 9001**

CERTIFICATION **ISO 14001**

 **ARCELOR SECTIONS COMMERCIAL S.A.**  
Groupe Arcelor

66, rue de Luxembourg  
L-4221 Esch-sur-Alzette  
LUXEMBOURG  
Tél. +352-5313 3007  
Fax. +352-5313 3095  
[www.sections.arcelor.com](http://www.sections.arcelor.com)  
[asc.sales@arcelor.com](mailto:asc.sales@arcelor.com)



**Arcelor Building Construction Support (BCS) favorise le développement des solutions Aciers dans la construction.**

**[www.constructalia.com](http://www.constructalia.com)**

Votre contact :

**ISO 9001**



## **ARCELOR SECTIONS COMMERCIAL S.A.**

66, rue de Luxembourg  
L-4221 Esch-sur-Alzette  
LUXEMBOURG  
Tél. +352-5313 3007  
Fax +352-5313 3095  
E-mail: [asc.marketing@arcelor.com](mailto:asc.marketing@arcelor.com)

Consultez notre site internet: **[www.sections.arcelor.com](http://www.sections.arcelor.com)**

