

Planchers de bâtiments en construction métallique et mixte

par **Daniel BITAR**

Docteur Ingénieur Génie Civil - INSA

Chef de projets de Recherche et Développement au Centre technique industriel

de la construction métallique (CTICM)

Enseignant à l'École nationale des ponts et chaussées

1. Planchers.....	C 2 645 - 2
1.1 Trames. Charges	— 2
1.2 Planchers. Guide de conception.....	— 4
2. Vibration et fréquence propre des planchers mixtes	— 16
2.1 Déformée modale du plancher.....	— 16
2.2 Application des charges. Calcul des flèches. Fréquence fondamentale du plancher	— 16
2.3 Planchers de basse fréquence	— 19
2.4 Calcul de la rigidité modale	— 19
2.5 Calcul de l'accélération maximale.....	— 19
2.6 Critères d'acceptation.....	— 19
Références bibliographiques	— 20

Les planchers constituent un plan horizontal rigide capable :
— de supporter les charges verticales (poids propre de différents composants et charges d'exploitation) et de transmettre ces charges aux poteaux sans effets préjudiciables sur le second œuvre ;
— de transmettre les efforts horizontaux (tels que ceux apportés par le vent ou les efforts sismiques) vers les éléments verticaux : palées de stabilité, poteaux de portiques, cage d'escaliers et/ou pignons rigides.

D'autres fonctions sont d'une importance plus ou moins majeure en relation avec la destination du bâtiment. Il s'agit de la flexibilité de passages verticaux et horizontaux (gaines et réseaux divers, et équipements techniques), de l'isolation acoustique et thermique, de la stabilité et de la résistance au feu.

Cet article présente les différents systèmes de planchers de bâtiments en montrant leurs modes de fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients.

La première partie de ce texte traite les aspects liés à la conception et donne des recommandations et des ordres de grandeur pratiques afin de permettre une définition rapide et efficace d'un avant-projet de plancher basé sur des comparaisons objectives : plancher mixte ou non mixte, poutrelles sous dalles ou intégrées, poutrelles alvéolaires ou à treillis, etc.

Le calcul à la vibration, fréquence fondamentale et accélération, des planchers mixtes sera développé dans la deuxième partie du texte. Une méthode simple d'application sera expliquée afin d'aboutir à une estimation viable de la réponse vibratoire des planchers.

Notations et symboles	
Symbol	Définition
A_a	Aire de la section du profilé métallique
A_s	Aire de la section de la membrure inférieure d'une poutrelle à treillis
a_{\max}	Accélération maximale
B	Largeur participante
D	Hauteur d'une poutrelle à treillis
d	diamètre d'un goujon
E	Écartement
F	Effort
f_0	Fréquence fondamentale du plancher
f_i	Fréquence fondamentale de chaque éléments
g	Accélération due à la pesanteur
H	Hauteur d'un goujon soudé ou d'une cornière clouée
H_T	Épaisseur ou hauteur du plancher
h_c	Épaisseur de la dalle
I_a	Moment d'inertie de la section du profilé de base
$I_{\text{ajourée}}$	Moment d'inertie de la section ajourée au centre de l'ouverture sans participation de la dalle
I_b	Moment d'inertie de la section de la poutre secondaire

Notations et symboles	
Symbol	Définition
I_m , ajourée	Moment d'inertie de la section ajourée mixte au centre de l'ouverture
I_1	Moment d'inertie de la dalle par mètre de largeur
k	Rigidité modale
L	Portée
ℓ	Longueur d'ancrage
N	Nombre de connecteurs par mètre linéaire
P	Poids ; charge concentrée
P_{Rd}	Résistance d'un connecteur
Q_k	Charge caractéristique concentrée
q_k	Charge caractéristique uniformément répartie
r	Rayon de pliage
S	Largeur du plancher
W	Largeur de la dalle
α_A	Coefficient de réduction
α_n	Coefficient de Fourier du n -ième composant
δ	Flèche maximale
ϕ	Diamètre d'une barre d'armature
ζ	Amortissement

1. Planchers

1.1 Trames. Charges

1.1.1 Trames

Avant de présenter les différentes solutions actuellement utilisées dans les planchers de bâtiments à étages en construction métallique, il est important d'insister sur la notion de trame. Il ne s'agit pas de présenter ici les différentes possibilités architecturales en termes de disposition de poteaux : bâtiments sans poteaux intermédiaires, bâtiments à deux rangées de poteaux, etc. Il est seulement question de rattacher le choix d'une solution à une portée économique où l'élément plan (dalle béton, dalle mixte ou patelage) assure la transmission des charges par flexion transversale et où l'élément filaire, poutre ou poutrelle, travaille en flexion longitudinale (figure 1).

Ainsi selon la géométrie de la trame, rectangulaire ou triangulaire, on adoptera une distribution à 45° (ou selon la bissectrice) pour la transmission des charges uniformément réparties sur le plancher de l'élément plan (dalle) vers les éléments filaires. À partir d'un rapport b/a supérieur ou égal à 4 (figure 2), la distribution en deux rectangles égaux est à adopter. En revanche, lorsque le « drainage » des efforts est forcé comme dans le cas de dalle nervurée (sur bac acier ou à nervures béton), la distribution des charges se fait vers les éléments porteurs sur lesquels reposent les nervures ; cela est très important surtout pour le calcul des planchers à trames carrées ou triangulaires (figure 3).

1.1.2 Charges

Les charges à considérer dans le calcul d'un plancher sont les charges permanentes et les charges d'exploitation.

Les **charges permanentes** sont, d'une part, le poids propre du plancher et d'autre part, les autres charges comme le revêtement de sol, la chape, l'étanchéité, l'isolation, les cloisons, les faux plafonds, parfois les faux planchers, et les équipements fixes. Ces derniers comprennent :

- les équipements des ascenseurs et escaliers roulants ;
- les équipements de chauffage, de ventilation et d'air conditionné ;
- les équipements électriques ;
- les tuyauteries, sans leur contenu ;
- les réseaux de câbles et les gaines.

Les tableaux 1 et 2 [1] donnent quelques valeurs indicatives des poids volumiques pour des matériaux et éléments de construction qui permettent d'évaluer le poids des charges permanentes dans le calcul du plancher.

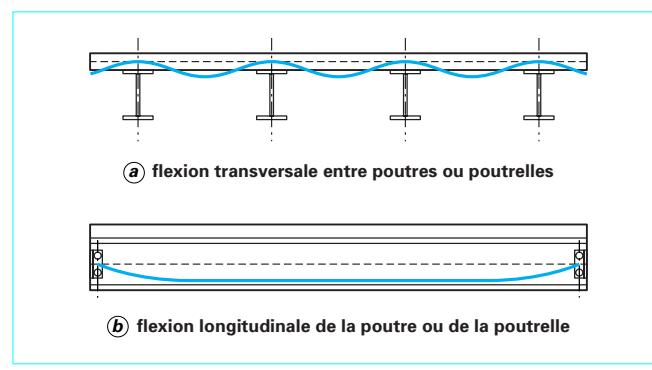
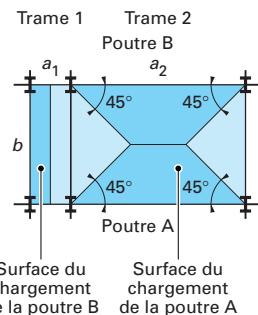


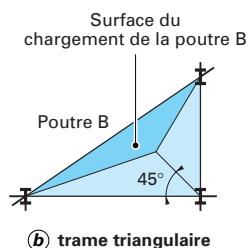
Figure 1 – Flexion transversale et flexion longitudinale d'un plancher

Tableau 1 – Poids volumiques des matériaux de construction

Matériaux	Poids volumique (kN/m ³)
Métaux :	
— acier	77 à 78,5
— fer forgé	76
— fonte	71 à 72,5
— aluminium	27
Béton (1) :	
— béton normal	24 (2) (25 béton non durci)
— béton normal armé – béton précontraint (taux normal d’armature)	25
— béton léger :	9 à 20
• béton léger classe de masse volumique LC 1,8	16 à 18
• béton léger classe de masse volumique LC 2,0	18 à 20
Bois :	
— Contreplaqué :	
• résineux	5
• bouleau	7
• panneaux lamellés et panneaux lattés	4,5
— Lamellé collé :	
• lamellé homogène GL24h	3,7
• lamellé homogène GL36h	4,4
— Panneaux agglomérés :	
• panneaux de particules	7,0 à 8,0
• panneaux de fibraglio	12,0
— Panneaux de fibres :	
• panneaux durs	10
• panneaux tendres	4,0
— chêne	7,8 à 8,5
— hêtre	6,8 à 7,5
— pin	5,9 à 6,5
Mortier :	
— mortier de ciment	19 à 23
— mortier de plâtre ou mortier de chaux	12 à 18
— mortier de chaux et de ciment	18 à 20
Maçonneries :	
— éléments pleins en terre cuite	21
— briques pleines	15,7 à 16
— briques creuses	11,8 à 12
Granulats :	
— légers	9,0 à 20
— normaux	20 à 30
— lourds	> 30
Gravier en vrac	15 à 20
Sable	14 à 19
Ciment	15 à 16 (en sacs/en vrac)
(1) Valeurs à augmenter de 1 kN/m ³ dans les cas suivants :	
— taux d’armature de béton armé ou de précontraint normal ;	
— béton non durci.	
(2) Suivant les matériaux locaux le poids volumique peut se situer entre 20 et 28 kN/m ³ .	
LC : <i>light weight concrete</i> (on a gardé LC dans le document normatif français)	
GL : <i>Glued laminated timber</i> (on a gardé GL dans le document normatif français)	



(a) trames rectangulaires



Dalle pleine : distribution des charges à 45° ou selon la bissectrice

Figure 2 – Distribution des charges uniformes sur les poutres

Les **charges d’exploitation** des bâtiments sont celles issues de l’occupation des locaux. Les valeurs à considérer dans le calcul doivent tenir compte :

- de l’usage normal que les personnes font des locaux ;
- des meubles et objets mobiles (cloisons mobiles, rangements, marchandises en conteneur, par exemple) ;
- des véhicules ;
- des événements rares prévus tels que concentrations de personnes ou de mobilier, déplacement ou empilage d’objets susceptibles de se produire à l’occasion d’une réorganisation ou d’un aménagement des locaux (ces charges sont à préciser contractuellement).

Pour déterminer les charges d’exploitation, il convient de classer les planchers en catégories en fonction de leur utilisation. Les surfaces des bâtiments résidentiels, sociaux, commerciaux ou administratifs seront classées selon leur usage spécifique, comme indiqué dans le tableau 3 [2].

Tableau 2 – Éléments de construction. Données pour l'estimation des charges permanentes

Éléments de construction	Poids surfacique (kN/m ²)
Hourdis pleins au plâtre (par cm d’épaisseur)	0,14
Parquet chêne de 24 mm	0,12
Chape asphalte (par cm d’épaisseur)	0,22
Carrelage de 3 cm (y compris mortier)	0,65
Cloisons : 2 plaques de plâtre + isolant	0,5 à 0,75
Dalle béton armé (par cm d’épaisseur)	0,25

Tableau 3 – Catégories de surfaces de bâtiments, selon l'eurocode NF EN 1990-1-1 [2]

Catégorie	Usage spécifique	Exemples
A	Habitation, résidentiel	Pièces des bâtiments résidentiels et des maisons ; chambres et salles des hôpitaux ; chambres d'hôtels et de foyers ; cuisines et sanitaires.
B	Bureaux	
C	Lieux de réunion (à l'exception des surfaces des catégories A, B, D, E et F)	C1 : Espaces équipés de tables etc. ; par exemple : écoles, cafés, restaurants, salles de banquet, salle de lecture, salles de réception. C2 : Espaces équipés de sièges fixées ; par exemple : églises, théâtres ou cinémas, salle de conférence, amphithéâtres, salle de réunion, salle d'attente. C3 : Espaces ne présentant pas d'obstacles à la circulation des personnes ; par exemple : salles de musée, salles d'exposition, etc., et accès des bâtiments publics et administratifs, hôtels, hôpitaux, gares. C4 : Espaces permettant des activités physiques ; par exemple : dancings, salles de gymnastique, scènes. C5 : Espaces susceptibles d'accueillir des foules importantes ; par exemple : bâtiments destinés à des événements publics tels que salles de concert, salles de sport y compris les tribunes, terrasses et aires d'accès, quais de gare.
D	Commerces	D1 : Commerces de détail courants. D2 : Grands magasins.
E	Stockage et locaux industriels	E1 : Espaces susceptibles de recevoir une accumulation de marchandises, y compris aires d'accès ; par exemple : aires de stockage, y compris stockages de livres et autres documents. E2 : Espaces à usage industriel.
F	Circulation et stationnement pour véhicules légers (PTAC ≤ 30 kN et nombre de places assises ≤ 8 , non compris le conducteur)	Garages ; parcs de stationnement, parkings à plusieurs étages.
G	Circulation et stationnement pour véhicules de poids moyen (30 kN \leq PTAC ≤ 160 kN et à deux essieux)	Voies d'accès, zones de livraison, zones accessibles aux véhicules de lutte incendie (PTAC ≤ 160 kN).

PTAC : poids total autorisé en charge.

Les charges d'exploitation sur les planchers sont modélisées par des charges uniformément réparties, par des charges linéiques (charge sur les garde-corps) ou des charges concentrées (véhicules). Le tableau 4, tiré de l'annexe nationale pour application en France de la norme NF EN 1991-1-1 [1], donne les valeurs des charges d'exploitation à prendre en compte dans le calcul des planchers. En outre, un coefficient de réduction est à appliquer à ces charges en fonction de la surface qui intéresse l'élément du plancher à étudier.

Pour une application en France, le coefficient de réduction α_A n'est utilisé que pour les catégories d'usage A, B, C3, D1, et F (tableau 3) à partir d'une surface A supérieure à 15 m^2 . Il faut noter qu'il n'y a pas de réduction à appliquer pour les autres catégories d'usage. Ce coefficient est donné par l'expression :

$$\alpha_A = 0,77 + \frac{A_0}{A} \leq 1,0$$

avec $A_0 = 3,5 \text{ m}^2$.

La dégressivité devient particulièrement intéressante pour des solutions hyperstatiques, comme les poutres continues. En effet, la surface A du chargement des poutres continues peut atteindre 100 à 120 m^2 ce qui va permettre l'utilisation d'un coefficient de réduction α_A égal à 0,8.

1.2 Planchers. Guide de conception

1.2.1 Plancher à poutrelles métalliques et dalle en béton armé non participante

1.2.1.1 Présentation et aide au choix

Cette solution convient pour un écartement entre les poutres de l'ordre de 3 à 7 m et des portées de poutres de l'ordre de 3 à 5 m. La dalle seule a une hauteur totale de l'ordre de 20 à 25 cm afin d'assurer un confort acoustique convenable dans le cas de bâtiments de logement ou de 12 à 15 cm pour les bâtiments de bureaux. La poutrelle métallique choisie, le plus couramment, dans la série des IPE a une hauteur de 200 à 360 mm. Pour franchir des portées supérieures à 5 m, on est rapidement confronté aux problèmes liés à l'épaisseur ou hauteur du plancher, notée H_T sur la figure 4, lequel doit satisfaire les conditions de flèches et ainsi conduire à une hauteur de plancher préjudiciable vis-à-vis de l'économie du projet. La figure 5 et le tableau 5 donnent les valeurs de flèches admissibles pour les planchers selon l'Eurocode 3 [3].

La hauteur du plancher H_T est donc d'une importance majeure. En effet, pour des bâtiments courants à hauteur imposée de l'ordre de 35 à 40 m, on constate qu'un gain de 20 cm sur l'épaisseur du

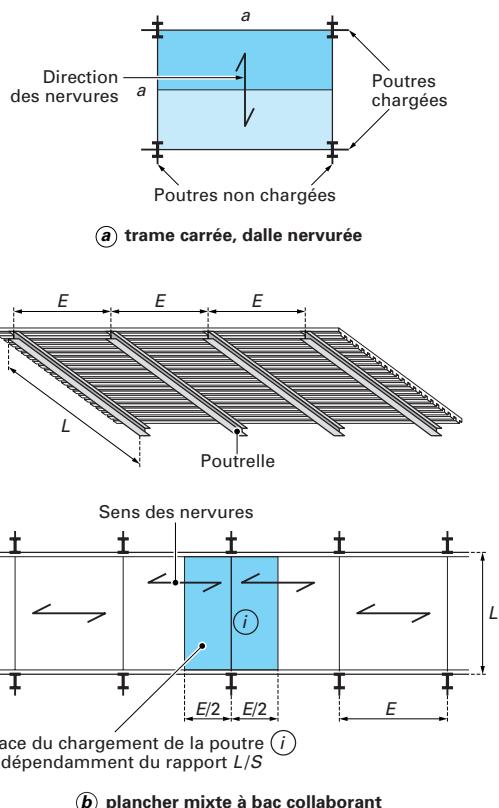


Figure 3 – Distribution des charges : cas particulier des planchers à dalle nervurée ou à bac collaborant

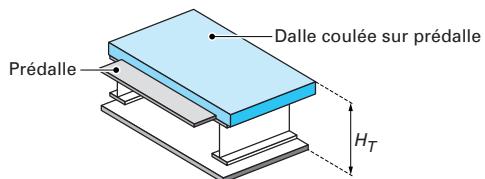


Figure 4 – Plancher à poutrelles métalliques et dalle non participante

plancher peut permettre de réaliser un étage supplémentaire. Pour des bâtiments à nombre d'étages imposé (de deux à six niveaux de planchers), le gain se limite à l'économie dans la réalisation de façades, poteaux, stabilités, murs séparatifs ainsi que dans la réalisation des servitudes verticales.

On peut maintenir cette solution pour des portées importantes à condition de disposer d'un espace vide dans le plénium pour une hauteur de la poutre de l'ordre de $L/15$ à $L/12$ (L étant la portée). En outre, afin de diminuer les flèches et améliorer le comportement vibratoire du plancher, on peut alléger la dalle de deux manières :

- soit par l'utilisation de tôles minces nervurées (bacs collaborants) ;
- soit par l'utilisation de dalles alvéolaires.

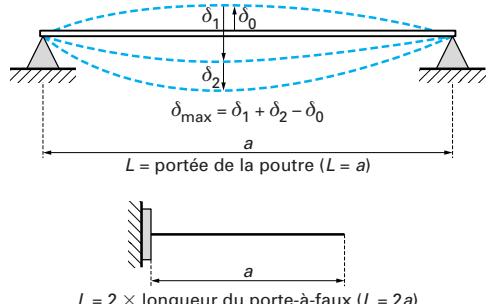
Tableau 4 – Charges d'exploitation sur les planchers des bâtiments en fonction de la catégorie de bâtiment

Aires chargées	q_k (kN/m ²) (1)	Q_k (kN) (2)
Catégorie A :		
— planchers	1,5	2
— escaliers	2,5	2
— balcons	3,5	2
Catégorie B	2,5	4
Catégorie C :		
— C1	2,5	3,0
— C2	4	4
— C3	4	4
— C4	5	7
— C5	5	4,5
Catégorie D :		
— D1	5	5
— D2	5	7
Catégorie E :		
— E1 (3)	6	7
— E1 (3)	7,5	7,0
Catégorie F	2,3	15
Catégorie G	5,0	90

(1) q_k (kN/m²) : Charge uniformément répartie - vérification globale.

(2) Q_k (kN) : Charge concentrée - vérification locale.

(3) Charges d'exploitation sur les planchers du fait du stockage.



δ_{\max} flèche dans l'état final, par rapport à la droite reliant les appuis ;

δ_0 précintrage (contre-flèche) de la poutre non chargée ;

δ_1 variation de la flèche de la poutre due aux charges permanentes immédiatement après la mise en charge ;

δ_2 variation de la flèche de la poutre due aux charges augmentée de toute déformation dans le temps due aux charges permanentes.

Figure 5 – Flèches admissibles pour les planchers

Les **tôles profilées** d'épaisseur courante sont de 0,75 mm (des tôles plus épaisses existent en 1,25 mm), elles comprennent une couche de galvanisation de 275 g/m² de zinc. La tôle profilée sert de coffrage et de plate-forme de travail en phase de chantier. En phase d'exploitation, la dalle prend une déformée de flexion et des contraintes de cisaillement se développent à l'interface entre l'acier et le béton.

Si la liaison entre la dalle et la tôle profilée en acier est parfaite, c'est-à-dire si les déformations longitudinales de la tôle et de la face du béton en contact avec la tôle sont égales, on parle de liaison (ou d'interaction) complète entre la tôle et le béton. La tôle joue alors le rôle d'acières d'armature.

Tableau 5 – Valeurs de flèches admissibles pour les planchers selon l'Eurocode 3 [3]

Situations dans les conditions normales d'utilisation	Valeurs limites δ_{\max}	Valeurs limites δ_2
Planchers en général	$L/250$	$L/300$
Planchers supportant des cloisons en plâtre ou en autres matériaux fragiles ou rigides	$L/250$	$L/350$
Planchers supportant des poteaux dont la flèche a une influence sur le comportement de la structure supportée par ces poteaux	$L/400$	$L/500$

Dans certains cas, des valeurs limites plus sévères s'avéreront appropriées à la destination de l'ouvrage, à la nature des matériaux de parois, etc.

Dans les **planchers mixtes**, une flèche importante en tête de console risque de faire apparaître ou d'augmenter la fissuration du béton sous moment négatif. Afin de ne pas mettre en cause la durabilité du béton, il convient, pour les poutres mixtes en porte-à-faux, d'adopter des valeurs plus sévères que celles données ci-dessus.

Lorsqu'il existe un glissement longitudinal entre la tôle et le béton le long de leur interface, on aura une liaison incomplète. L'écart entre le déplacement longitudinal de l'acier et celui du béton se caractérise par un décalage unitaire (décalage par unité de longueur) que l'on appelle glissement entre tôle et béton dans la section.

La collaboration tôle-béton peut être assurée (figure 6) par un ou plusieurs des moyens suivants :

- liaison mécanique par déformations des parois du profil (embossages ou bossages) (figure 6d) ;
- profils à formes rentrantes où la collaboration est due au frottement (figure 6e) ;
- ancrage d'extrémité par des goujons soudés ou autre type de connexion locale entre le béton et le bac acier (figure 6f).

Ce dernier cas est très intéressant car il permet d'élargir le champ d'application des tôles minces dans le domaine des planchers de bâtiment. Dans le calcul de ce type d'ancrage, il faut considérer la coexistence d'un effort rasant appliqué sur les connecteurs venant, d'une part, de la flexion transversale de la dalle mixte et, d'autre part, d'un autre effort rasant dû à la flexion principale de la poutre (figure 6f).

Un **treillis soudé antifissuration** est normalement disposé près de la face supérieure du béton pour atténuer les fissures dues au retrait du béton. Actuellement, les bacs collaborants (figure 6) sont d'utilisation courante dans les bâtiments de bureaux. Ils permettent de franchir, sans étalement, des portées de 2,5 à 3 m (4 à 5 m avec étais) entre les poutres pour une hauteur de nervures de 40 à 80 mm. Le gain en poids de dalle, dû à la présence des nervures dans le bac acier varie, entre 40 à 100 kg par mètre carré de plancher.

En vue de répondre à certaines exigences, telles que la **résistance à l'incendie**, il est possible de mettre des armatures complémentaires pour armer le béton dans les nervures dans le sens porteur de celles-ci. La dalle (tôle + béton) a une épaisseur de 8 à 30 cm. Les épaisseurs courantes de dalle mixtes à bac collaborant vont de 12 à 16 cm.

Le calcul de la résistance de dalles mixtes à bac collaborant est à effectuer selon les avis techniques du CSTB [4] et selon l'eurocode 4 [5]. Généralement les fabricants de ces produits établissent des tableaux de valeurs de charge d'utilisation en fonction de la portée.

Les **dalles alvéolaires** constituent aussi une solution efficace (figure 7) pour l'allègement du poids propre du plancher. Les ar-

tures de précontrainte par fils adhérents augmentent la résistance et permettent à la dalle alvéolaire le franchissement de portées importantes, c'est-à-dire un écartement entre poutres de 7 à 12 m pour une épaisseur de la dalle alvéolaire de l'ordre de 16 à 24 cm. Pour ce type de dalle, le traitement des joints en seconde phase peut être nécessaire en l'absence d'une chape généralisée sur toute la surface du plancher.

Le dimensionnement des dalles alvéolées est traité par divers documents publiés par la Fédération Internationale de la Pré-contrainte (FIP) et les normes européennes [6] [7] [9].

1.2.1.2 Points particuliers

1.2.1.2.1 Transmission des efforts horizontaux

Dans les solutions précédentes, la dalle (dalle pleine, dalle à bac collaborant ou dalle alvéolaire) repose sur les poutrelles métalliques sans attache mécanique entre les deux éléments.

Le frottement entre ces deux composants et l'éventuelle adhérence acier/béton à l'interface dalle-poutrelle métallique ne sont pas suffisants pour assurer la transmission des efforts horizontaux de la dalle vers les poutres en particulier, lorsque les charges horizontales (vent) sont appliquées directement sur la dalle.

Exemple : montants de la façade fixés directement sur la dalle (figure 8).

Pour garantir le fonctionnement du plancher comme un plan horizontal rigide capable de transmettre les efforts horizontaux vers les éléments de stabilité verticaux, on donne à la figure 9 quelques dispositions classiques pour assurer la transmission des efforts horizontaux entre la dalle et la poutrelle métallique.

1.2.1.2.2 Passages des canalisations, équipements techniques et ventilations

Les planchers à poutrelles métalliques à âme pleine laminé de type IPE ou PRS (profilé reconstitué soudé) n'offrent pas de possibilité pour le passage horizontal des équipements techniques.

Deux solutions se présentent dans les projets de bâtiments à étages :

- les équipements sont localisés et par conséquent des trous bien positionnés sont à pratiquer dans l'âme de poutre métallique ;
- les équipements sont très variés et dispersés compte tenu des contraintes d'utilisation du bâtiment projeté. Ce dernier point fera l'objet d'un type bien connu de plancher (voir § 1.2.2.3).

Concernant les ouvertures isolées dans l'âme (figure 10a), une attention particulière doit être apportée au raidissement nécessaire au droit de ces ouvertures. Les références [9] [10] donnent des indications sur la façon de vérifier et de juger de la nécessité ou non de raidissement, mais il faut noter que le coût de la réalisation d'une ouverture avec son raidissement, selon la configuration la plus simple de la figure 10b, peut parfois doubler le prix de la poutrelle concernée.

Exemple : une poutrelle IPE 400 d'une portée de 12 m avec deux ouvertures raidies de 350 mm × 225 mm.

1.2.1.2.3 Feu. Sécurité incendie

Dans les solutions précédentes, pour procurer la résistance au feu, l'élément métallique peut être protégé soit directement par des produits projetés, soit par un sous-plafond (se reporter toujours aux procès-verbaux d'essais réglementaires). Le plenum, dans des planchers de grandes dimensions, doit être recouvert par des cloisonnements évitant la propagation des fumées et des flammes. L'entretien ou la transformation des équipements qui occupent le plenum doit respecter ces parois, ou il convient de les rétablir en cas de détérioration après chaque intervention. Une solution intéressante consiste à ménager l'accès du plenum par le dessous du plancher.

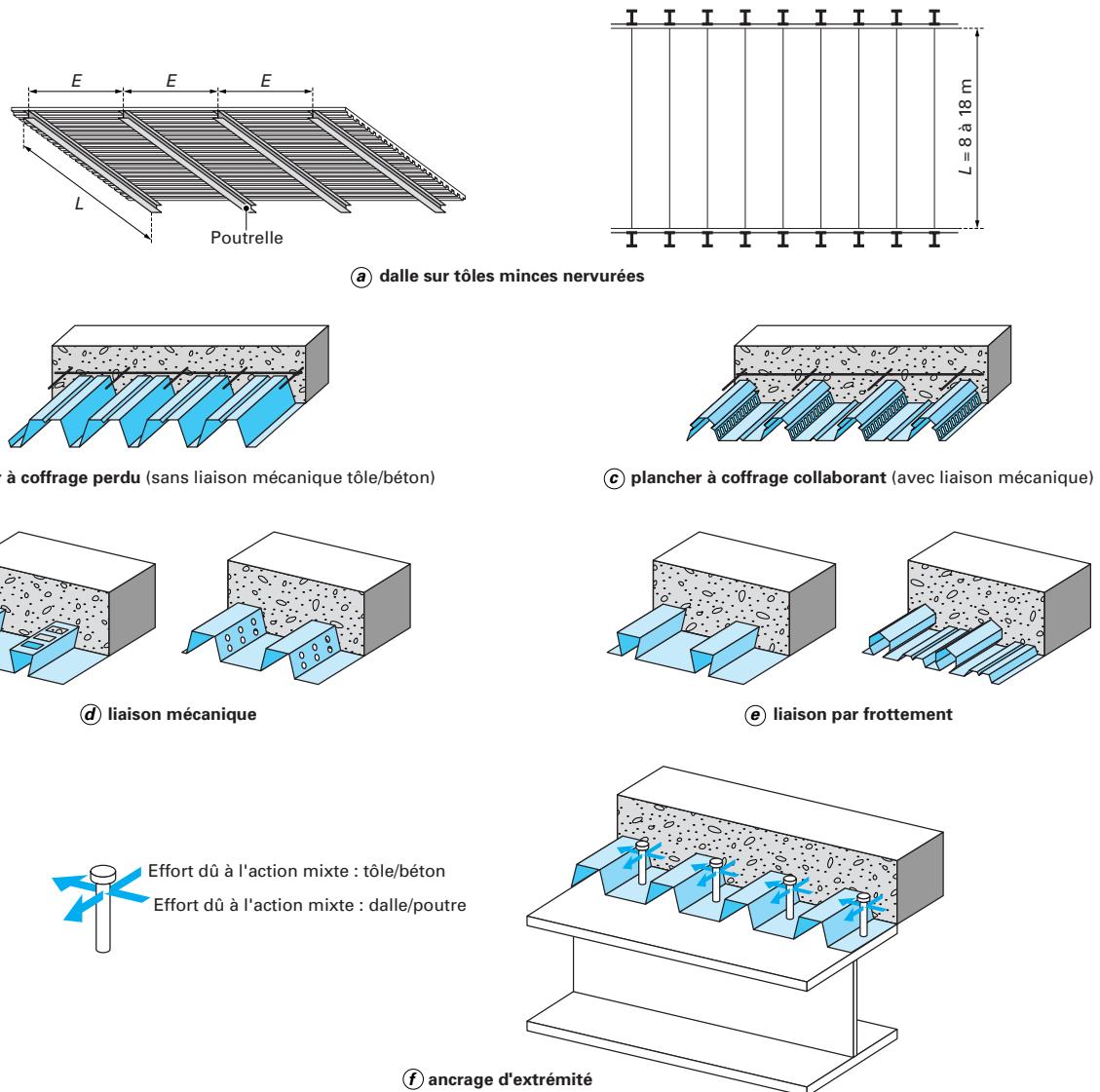


Figure 6 – Formes typiques de liaisons dans les dalles mixtes à bac collaborant

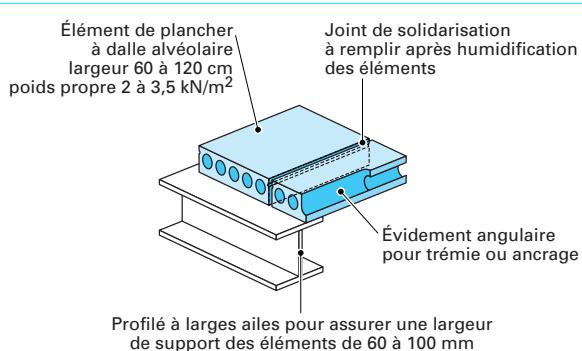


Figure 7 – Plancher à poutrelles métalliques et dalle alvéolaire

1.2.2 Planchers mixtes acier-béton à poutrelles sous dalle

Une des solutions efficaces permettant de réduire les flèches (de 2 à 4 fois) et d'augmenter la résistance (de 2 à 3 fois) des poutres mixtes par rapport à celles de la solution acier seul consiste à attacher la dalle à la poutrelle métallique par des connecteurs. Cela est très intéressant pour les grandes portées (de 8 à 30 m).

Concernant la flexion transversale de la dalle, la situation est identique à celle des cas précédents. En revanche pour la poutrelle métallique, il s'agit de faire participer une partie de la dalle et de calculer les caractéristiques flexionnelles et torsionnelles de la section mixte acier-béton en forme de T.

Pour une poutrelle simple sur deux appuis, la largeur participante de la dalle supposée constante sur sa longueur se calcule facilement à partir de l'expression donnée à la figure 11.

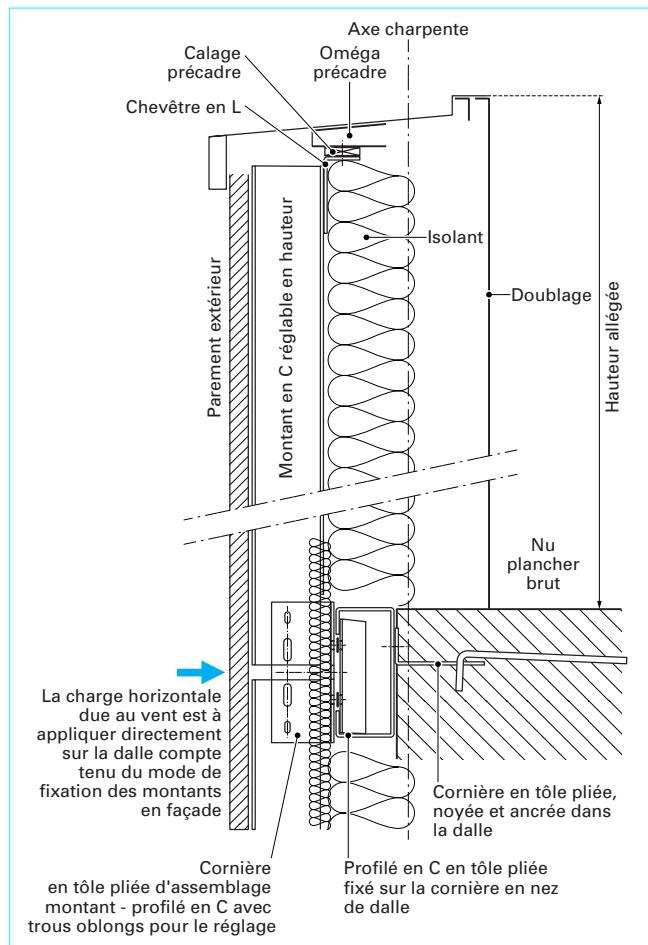


Figure 8 – Exemple de liaison entre montant de façade et plancher

1.2.2.1 Connecteurs

Plusieurs types de connecteurs sont envisageables. La figure 12 montre les différents types de connecteurs utilisés en construction mixte acier-béton. Dans les bâtiments, les connecteurs courants sont :

- les **goujons soudés** : de 16 à 22 mm de diamètres et jusqu'à 250 mm de hauteur ;
- les **cornières clouées** : de 80 à 140 mm de hauteur.

Ces moyens de connexion dits « automatique », car mis en œuvre par un outillage spécialisé, peuvent être remplacés par des produits sidérurgiques laminés (barreaux, cornières) soudés directement sur le profil. Généralement dans les planchers de bâtiment, la connexion de la dalle nécessite, par mètre carré de plancher, 3 à 6 goujons soudés (diamètre 19 mm) et 8 à 12 cornières clouées (de hauteur 100 à 110 mm). Le tableau 6 donne la résistance des connecteurs pour un prédimensionnement.

La solution d'utiliser ou non un plancher mixte résulte de considérations économiques sur le gain de poids d'acier et le prix de la connexion (fourniture et pose de connecteurs).

■ Manière simple et rapide d'évaluer le nombre de connecteurs pour le prédimensionnement

Soit P_{Rd} la résistance d'un connecteur déterminée à partir du tableau 6 ; B la largeur participante de la dalle et h_c son épaisseur selon la figure 11.

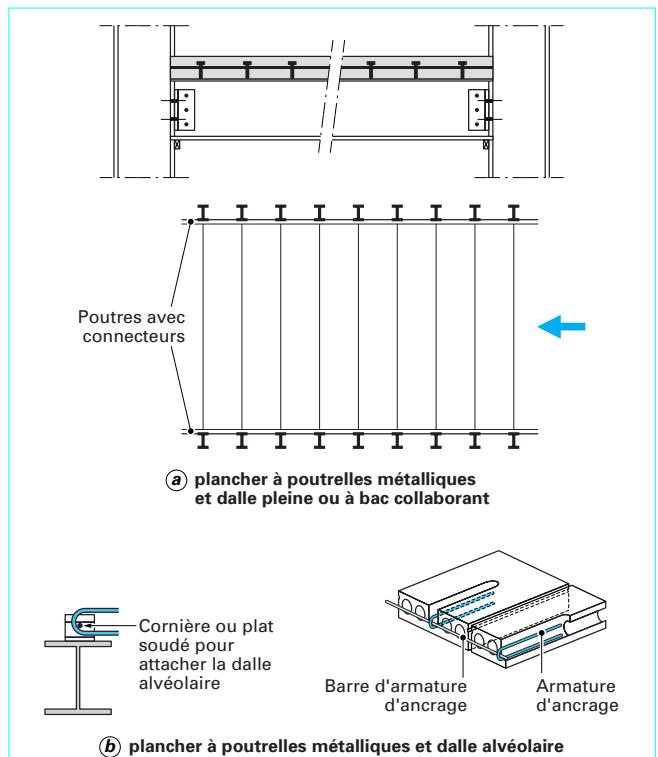


Figure 9 – Dispositif pour assurer la transmission des efforts horizontaux

Tableau 6 – Résistance des connecteurs (hypothèses : dalle pleine, béton normal B25)

Connecteur	Résistance de calcul à l'état ultime (P_{Rd}) (kN)
Goujons soudés ($d = 16$ mm, $H \geq 75$ mm) ..	52
Goujons soudés ($d = 19$ mm, $H \geq 80$ mm) ..	73
Goujons soudés ($d = 22$ mm, $H \geq 90$ mm) ..	98
Cornières clouées ($H = 95$ ou 110 mm)	28
Cornières clouées ($H = 125$ ou 140 mm)	30

En présence d'un bac collaborant, l'affaiblissement de la résistance peut atteindre 30 à 50 % de la valeur donnée ci-dessus.

L'effort nécessaire (en kN) pour attacher la dalle, pour le cas d'un béton normal courant B25 ou de classe C25/30 selon les euro-codes [5] [11], est :

$$F_b = 1,42 \cdot B \cdot h_c$$

avec B et h_c en cm.

L'effort nécessaire (en kN) pour attacher le profil, pour le cas d'un acier courant de nuance S235, est :

$$F_a = 23,5 A_a$$

avec A_a (aire du profil en cm^2).

Le nombre N de connecteurs par mètre linéaire d'une poutrelle chargée uniformément est égal à :

$$N = 2 \times \text{Min} \{F_a; F_b\} / (P_{Rd} \cdot L)$$

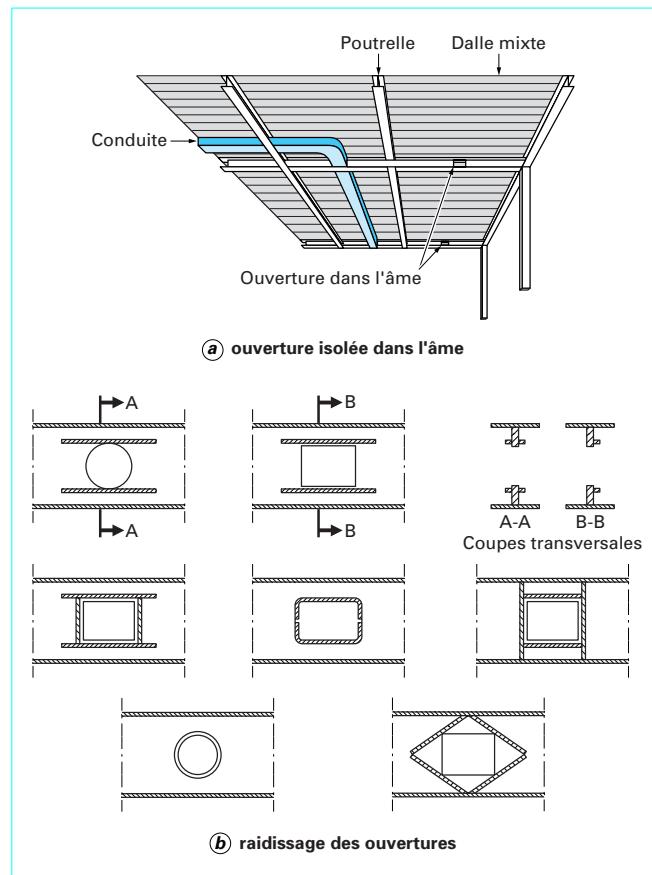


Figure 10 – Ouverture isolée dans l'âme et raidissage des ouvertures

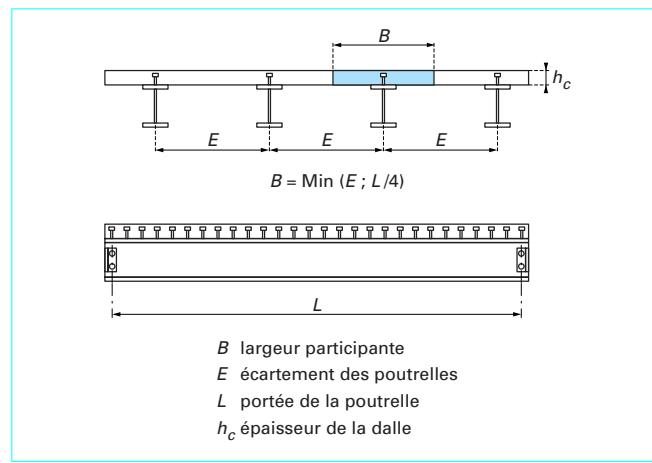


Figure 11 – Plancher mixte. Largeur participante de la dalle

1.2.2.2 Planchers mixtes à poutrelles métalliques à âme pleine

Les trois situations évoquées au paragraphe 1.2.1 peuvent être utilisées avec parfois certaines dispositions pour réaliser la connexion acier-béton.

Pour la **dalle pleine coulée sur une pré dalle**, la connexion de la dalle ne pose pas de problème particulier. On disposera normalement de l'espace nécessaire entre pré dalle pour mettre en place les connecteurs.

En présence d'un **bac collaborant**, une attention particulière doit être portée sur la réalisation de la connexion à travers le bac. Les deux principaux paramètres à prendre en compte sont la forme géométrique des ondes et l'épaisseur de la tôle galvanisée.

Du point de vue de la configuration géométrique des ondes, tous les bacs collaborants disponibles sur le marché français ont des dimensions permettant l'un des deux modes de fixation couramment utilisés : les goujons soudés et les cornières clouées.

En revanche, pour le soudage de goujons, la présence du bac galvanisé rend délicate l'opération de pose. Il faut localement, fondre le métal du bac selon son épaisseur, et en surface de la semelle de la poutre métallique. La présence de zinc, l'humidité ambiante, la présence de calamine nécessitent de prendre des précautions particulières et de bien contrôler les modes opératoires de soudage pour éviter le collage des goujons ou la fragilisation de la jonction soudée. Cela a conduit l'eurocode 4 à limiter le champ d'application des goujons soudés à des épaisseurs de bac ne dépassant pas 1,5 mm.

Actuellement, le développement de l'utilisation des bacs prépercés permet le soudage des goujons directement en atelier. Cette solution, quoique plus chère, évite les risques évoquées ci-dessus.

S'agissant du calcul de la résistance des connecteurs en présence de bacs, des essais ont montré d'une manière très claire que les connecteurs en présence d'un bac pouvaient présenter des résistances ultimes affaiblies lorsque ces connecteurs ne débordaient pas suffisamment de la crête d'onde du bac et si la forme géométrique de l'onde n'assurait pas un enrobage suffisant des connecteurs. L'eurocode 4 (chapitre 6) donne les conditions pour calculer la résistance des connecteurs en présence d'un bac, en fonction des caractéristiques dimensionnelles des éléments et en fonction de l'orientation des ondes par rapport à l'axe longitudinal de la poutre.

Pour terminer sur cet aspect de résistance, il ne faut pas perdre de vue que dans les **poutrelles mixtes** (poutrelle métallique associée à une dalle à bac collaborant), l'affaiblissement de la résistance des connecteurs par la présence du bac, cumulé à des limitations d'ordre pratique (place disponible pour fixer les connecteurs dans les ondes, espacements imposés à ces connecteurs par la configuration du bac, etc.) conduit inévitablement à des situations où l'interaction entre le profilé et la dalle n'est plus complète et n'est plus capable de reprendre la totalité des efforts de cisaillement longitudinaux le long de l'interface acier-béton. Le chapitre 6 de l'eurocode 4 permet de calculer la résistance résiduelle de la poutrelle mixte dans cette dernière situation [12] (en relation avec les corrections précisées au § 1.2.2.1).

La **solution proposée par Hoesch Additive Deck** [13] [14] (figure 13) présente des caractéristiques techniques qui peuvent s'avérer intéressantes pour certains projets :

- hauteur des nervures de 200 mm : elle permet de franchir sans étais un écartement entre poutrelles de 5 à 6 m ;
- connexion réalisée directement sur la poutre ;
- portée de la poutre : elle peut atteindre 15 à 18 m ;
- poids propre de l'ordre de 2,2 à 3,5 kN/m² ;
- charge d'exploitation de 5,0 à 7,5 kN/m² ;
- résistance à l'incendie : selon les cas de 30 à 90 min ;
- isolation acoustique de 55 dBA.

1.2.2.3 Planchers mixtes à poutrelles ajourées

Les constructions modernes exigent de plus en plus l'aménagement d'installations techniques considérables et complexes : chauffage, ventilation, conditionnement d'air, etc.

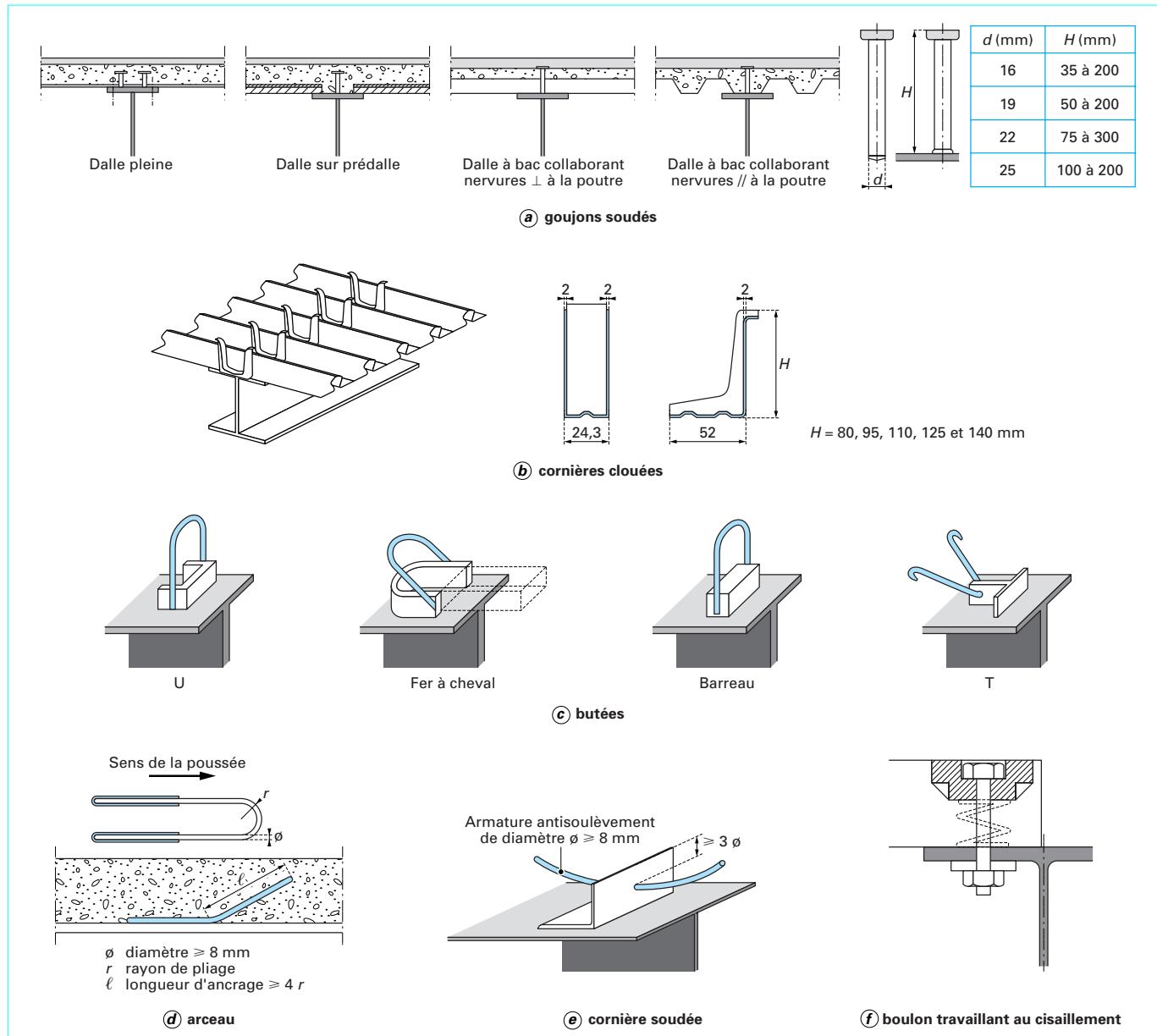


Figure 12 – Différents types de connecteurs dans les planchers mixtes

L'utilisation de poutrelles ajourées apporte actuellement des réponses efficaces à la demande des maîtres d'ouvrages. Cette solution procure de grands plateaux libres de portées de l'ordre de 12 à 18 m et permet le passage de conduits divers à l'intérieur du plenum. Deux familles de poutres alvéolaires sont disponibles :

- les poutrelles ajourées à nid-d'abeilles ou à ouvertures hexagonales (figure 14) ;
- les poutrelles ajourées à ouvertures circulaires (figure 15).

Les poutrelles sont espacées de 2,5 à 3 m (voire 5 à 6 m en cas d'utilisation de prédalles) et les ouvertures sont espacées de l'ordre de 1,25 à 1,5 fois le diamètre, qui peut atteindre 300 mm dans les cas courants. Cette solution offre les performances suivantes :

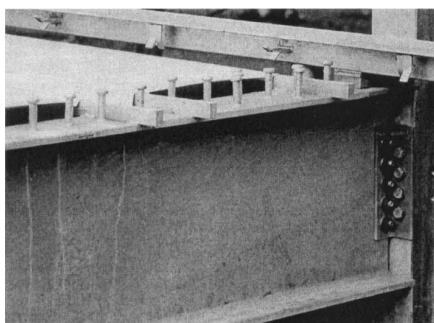
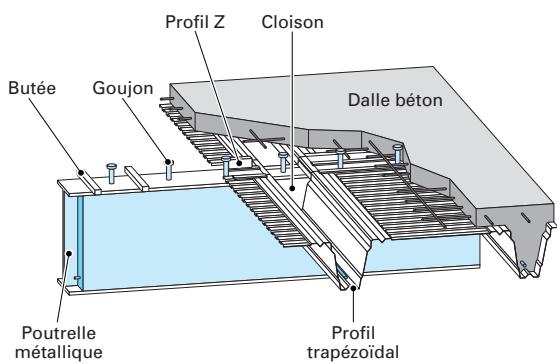
— dans le **cas d'un plancher non mixte** :

$$I_{\text{ajourée}} = 2 \text{ à } 3 \times I_a$$

— dans le **cas d'un plancher mixte** :

$$I_{m,\text{ajourée}} = 4 \text{ à } 5 \times I_a$$

- avec I_a moment d'inertie de la section du profilé de base (le profilé servant à obtenir la poutrelle ajourée),
 $I_{\text{ajourée}}$ moment d'inertie de la section ajourée au centre de l'ouverture sans la participation de la dalle,
 $I_{m,\text{ajourée}}$ moment d'inertie de la section ajourée mixte au centre de l'ouverture.



(b) réalisation

Figure 13 – Détails du plancher Hoesch Additive Deck

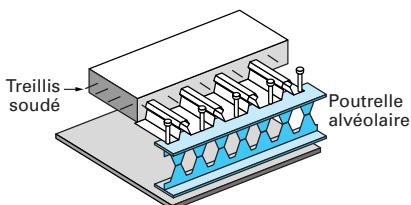


Figure 14 – Poutrelle ajourée à nid-d'abeilles ou à ouvertures hexagonales

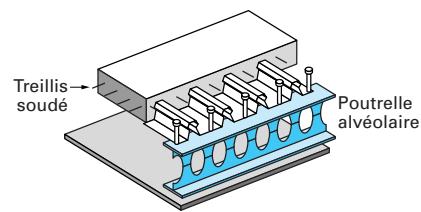


Figure 15 – Poutrelle ajourée à ouvertures circulaires

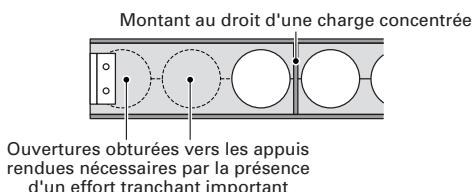


Figure 16 – Dispositions courantes dans les poutrelles alvéolaires

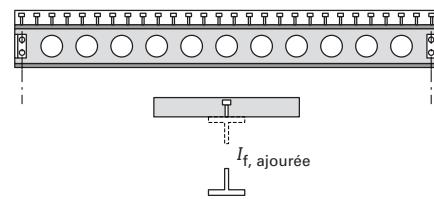


Figure 17 – Inertie efficace des poutrelles mixtes ajourées

Néanmoins, dans le calcul de ce type de poutre, il faut prendre en compte le comportement local de la section autour des ouvertures (effet Vierendeel [9] [10]) en imposant, parfois, le raidissement ou la fermeture d'une ou deux ouvertures vers les appuis. Des raidisseurs transversaux sont à mettre systématiquement au droit des charges concentrées directes (figure 16).

En **cas de grande portée**, le critère dimensionnant pour ces poutrelles est la limitation des déformations et des périodes de vibration. Deux **expressions simples pour un calcul rapide d'avant-projet** consistent à appliquer les formules classiques de calcul de flèche en se limitant à une inertie constante de la poutre égale :

- pour les poutrelles ajourées non mixtes, à $0,75 \times I_{\text{ajourée}}$;
- pour les poutrelles mixtes ajourées, à $0,75 \times I_{\text{f,ajourée}}$;

avec $I_{\text{f,ajourée}}$ moment d'inertie fictive calculé en négligeant la membrure supérieure en acier selon la figure 17 [15].

Dans les **planchers de bâtiments à plateaux libres de grandes portées** (12 à 18 m), le comportement vibratoire est déterminant et dimensionnant dans la plupart des cas. Cet aspect sera abordé au paragraphe 2.

La surface à protéger à l'incendie est identique à celle du profilé de base, mais nous attirons l'attention sur le fait qu'un supplément d'épaisseur de la couche de protection de 2 à 3 cm s'avère parfois nécessaire et qu'il faut prévoir des diamètres d'ouvertures de 3 à 5 cm supérieurs à ceux des gaines, afin de ne pas détériorer la protection autour des alvéoles, figure 18.

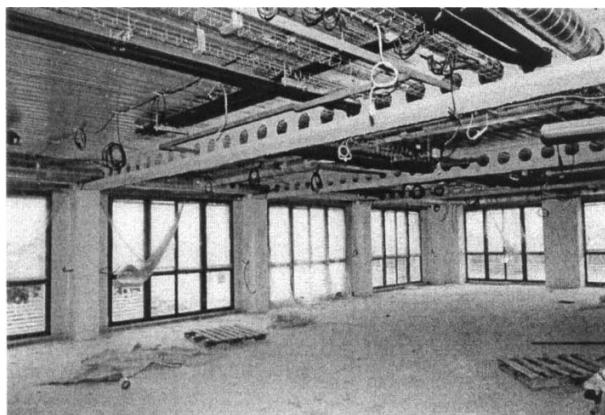
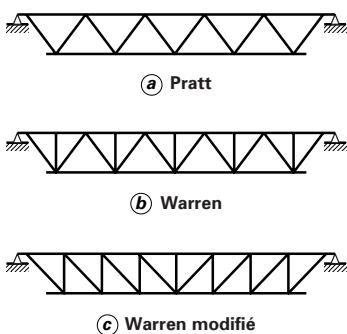


Figure 18 – Protection sur le contour des ouvertures

1.2.2.4 Planchers mixtes à treillis

Les treillis mixtes offrent les mêmes facilités de passage de conduits que les poutrelles ajourées. Mais, ce type de construction demande une grande standardisation des poutrelles à treillis d'où une application préférentielle pour des surfaces de plancher importantes (cas d'immeubles de grande hauteur IGH). La figure 19 montre les configurations classiques des poutres à treillis.

Le tableau 7 donne quelques exemples de réalisation indiquant que la portée économique pour ce type de plancher se situe entre 10 et 20 m. On retiendra que la consommation d'acier pour résister aux charges verticales est de l'ordre de 40 kg/m² de plancher.



Conditions d'application :

- portée économique 10 à 20 m ;
- standardisation des poutrelles ;
- bâtiments de grande hauteur ou grande surface de plateau libre.

Figure 19 – Configurations des poutrelles à treillis

Tableau 7 – Exemple de projets avec des poutres treillis

Projet	Nombre d'étages	Consommation acier (kg/m ²)	Portée treillis/Espacement (m)
Tour Campeau (Edmonton)	29	40,4	12,0/3,0
Edmonton Center 3	29	39,3	10,7/2,95
Edmonton Center 5	32	40,8	10,8/2,95
Tour Sears (Chicago)	109	161 (plancher + contre ventement latéral)	22,9/4,57

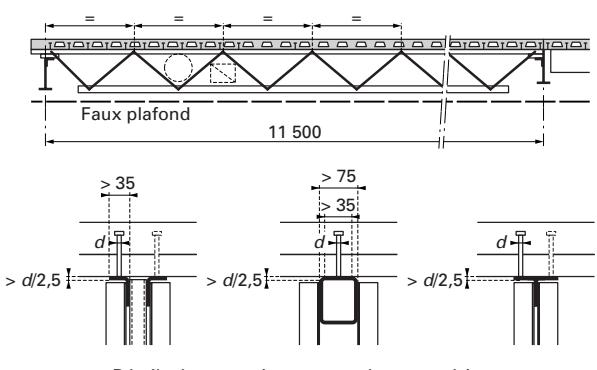


Figure 20 – Poutrelle mixte à treillis

Dans ce type de poutrelle de plancher mixte, la membrure supérieure doit avoir des dimensions adéquates pour recevoir la connexion et une résistance suffisante en phase de coulage car la poutrelle à treillis résiste seule (figure 20).

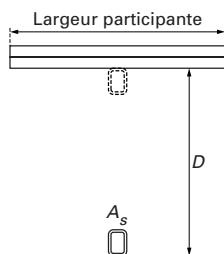
En phase de coulage, toutes les précautions et les vérifications d'une charpente métallique classique doivent être appliquées. Pour un prédimensionnement rapide en phase d'exploitation (ou phase mixte), le moment de résistance à la flexion ainsi que la connexion peuvent être calculés selon la figure 21. Enfin, concernant le calcul des déformations (flèches), un modèle en éléments de barres est à utiliser [15] en tenant compte de l'excentricité.

1.2.2.5 Planchers mixtes à poutres Vierendeel/Gerber

Un système porteur offrant des économies de matière et une très grande flexibilité pour le passage des gaines consiste à associer une dalle mixte à bac collaborant à des poutrelles mixtes de type « Gerber ». Les poutres principales sont des poutres mixtes de type « Vierendeel ». On peut appeler ce système : plancher mixte alvéolé où les ouvertures sont rectangulaires (figure 22).

La poutre Gerber est à travée simple avec deux consoles. Une travée isostatique prend appui en têtes de consoles. Les nervures sont perpendiculaires aux poutrelles qui doivent avoir un écartement de 1,5 à 3 m.

La poutre de type Vierendeel (figure 22) est constituée d'une membrure supérieure (la dalle mixte) et d'une membrure inférieure (normalement un profilé laminé de type HEA). Les deux membru-



Pour le prédimensionnement :

- moment résistant :

$$M = A_s \cdot f_y \cdot D$$

avec f_y limite d'élasticité de l'acier ;

- nombre de connecteurs par mètre linéaire de la poutre treillis :

$$N = 2A_s \cdot f_y / (P_{Rd} \cdot L)$$

avec L portée de la poutre treillis

P_{Rd} résistance au cisaillement d'un connecteur déterminée à partir du tableau 6. Avec un minimum de 1 connecteur tous les 500 mm et une connexion (2 à 4 connecteurs) au droit ou à proximité de chaque nœud.

Figure 21 – Section résistante

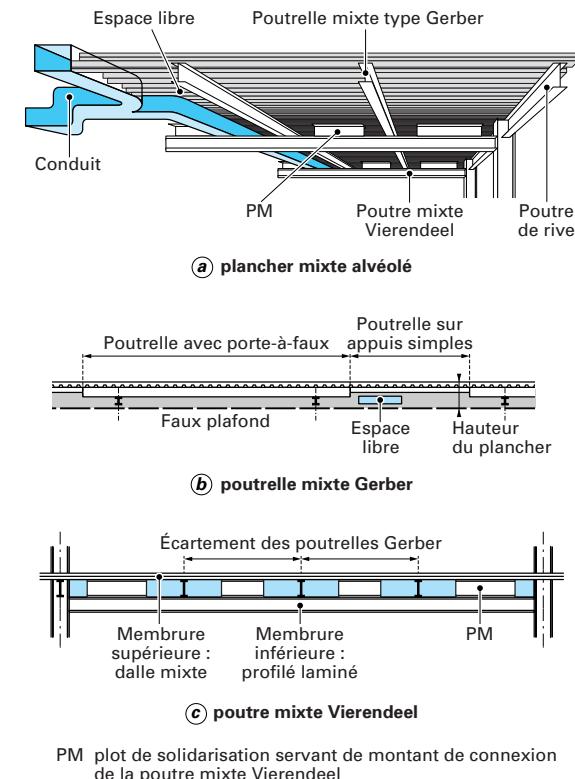


Figure 22 – Plancher à poutre de type Vierendeel

res sont reliées par des plots de solidarisation servant de montants de connexion. Ces montants sont constitués de profilés d'acier (normalement de type IPE) de faible longueur. La portée écono-

mique de la poutre mixte Vierendeel (dalle + membrure inférieure + montants) est de l'ordre de 14 à 18 m.

La hauteur structurale (poutrelles + dalle) de ce plancher est supérieure à celle du système précédent compte tenu de la superposition des éléments. Mais, il ne faut pas conclure que la hauteur totale (épaisseur hors tout) du plancher va être trop importante compte tenu du passage des conduits dans les ouvertures qui sont importantes et peuvent atteindre 1 m de longueur et 35 cm de hauteur.

Le calcul de ce système reste simple [15] [16] ; nous attirons l'attention sur l'importance des aciers d'armature et de la connexion au droit et sur la longueur de chaque montant de connexion.

La poutre de type Vierendeel ne devient effective qu'après durcissement du béton (phase mixte) connecté sur la longueur du montant. Par conséquent, il est nécessaire d'étayer les poutres en phase de coulage. Dans les années 1980, plus de 1,5 million de mètres carrés de plancher ont été réalisés au Canada avec ce système.

1.2.3 Planchers mixtes acier-béton à poutrelles intégrées

On améliore sensiblement le comportement à l'incendie du plancher en protégeant l'acier par l'intégration de la poutrelle dans l'épaisseur du plancher. Cet enrobage se fait normalement au cours d'une des étapes de la construction de ce type de plancher (figure 23). Le principe est simple : des dalles alvéolaires ou des bacs acier de grande hauteur sont posés entre les poutrelles distantes de 5 à 8 m. Une chape de 8 à 10 cm d'épaisseur sera coulée ensuite en veillant au remplissage de l'espace autour des poutrelles. Normalement, la portée varie de 8 à 12 m.

Sans protection supplémentaire, la poutrelle assure une résistance au feu de 1 h pour un niveau de chargement de l'ordre de 0,4 (rapport de la sollicitation en situation d'incendie/à la résistance normale à froid). La poutrelle en acier est enrobée de béton sur trois faces, sa résistance à l'incendie est largement améliorée par rapport à un système de poutrelles traditionnelles. Une protection de la face inférieure de la semelle par peinture ou autres moyens est rarement nécessaire pour un degré de stabilité au feu de 1 h. En outre, l'enrobage réduit considérablement les risques de corrosion et le coût de l'entretien. Les derniers développements sur les méthodes de dimensionnement des poutrelles intégrées se rapprochent d'un comportement mixte acier/béton par adhérence naturelle sans connecteur. En effet, des essais de laboratoire ont montré que le plancher se comportait mieux que la simple addition des comportements des parties poutrelles en acier et dalles en béton, et une collaboration acier-béton se développe par adhérence [13]. Dans les pays scandinaves, ce système est bien établi pour les bâtiments de bureaux. En France, le développement de ce système reste encore limité, ce type de construction a été adopté pour la réalisation des planchers du bâtiment de l'École nationale des ponts et chaussées à Marne-la-Vallée où des dalles alvéolaires sont associées à des poutrelles métalliques IFB (Integrated Floor Beam) (cf. paragraphes 1.2.3.1 et 1.2.3.2).

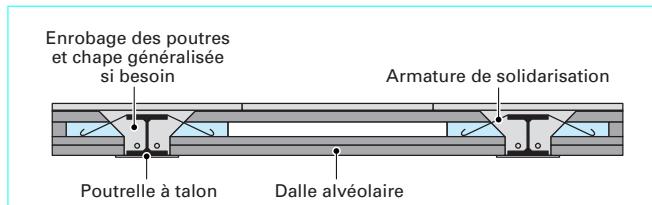


Figure 23 – Planchers mixtes acier-béton à poutrelles intégrées

1.2.3.1 Poutrelles métalliques

La poutrelle métallique doit avoir une inertie flexionnelle et torsionnelle suffisante lors de l'exécution de la phase de coulage ; en phase d'exploitation, la section à considérer dans les calculs de la résistance et des déformations est la section mixte constituée de la poutrelle métallique et le béton d'enrobage (béton entre les ailes). Par rapport à la poutrelle métallique seule, la section mixte (poutrelle métallique + béton d'enrobage) permet un gain de résistance à la flexion, selon la configuration, de 10 à 20 % et un accroissement de la rigidité flexionnelle (réduction des flèches) de 1,3 à 1,8 fois. Ces valeurs peuvent être utilisées au stade de l'avant-projet pour le prédimensionnement des sections.

Des sections de la série HEA ou HEB sont couramment utilisées pour des portées de 8 à 12 m.

Un plat additionnel est souvent soudé en semelle inférieure pour servir de support à la dalle. Normalement, il faut distinguer deux situations :

— **poutrelles intermédiaires** : la figure 24 montre différentes configurations de sections de poutrelles à talon développées par divers fournisseurs [17] ;

— **poutrelles de rives** : les deux aspects majeurs de la conception des poutrelles de rive sont la rigidité torsionnelle et la rétention du béton lors du coulage afin de ne pas avoir un supplément de coût dans la fabrication d'un coffrage de nez de dalle. Les formes de sections possibles sont illustrées à la figure 25.

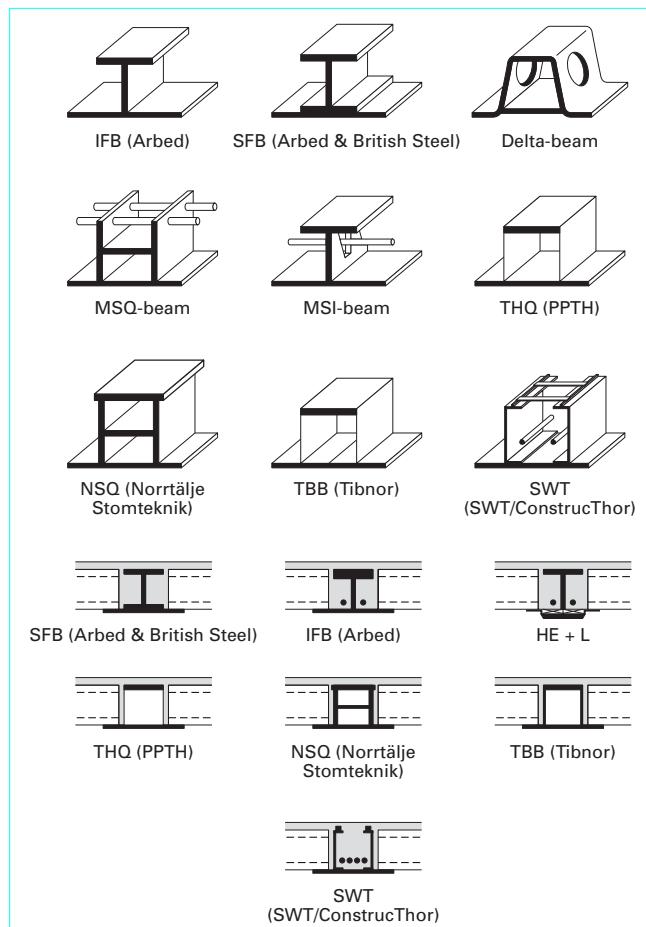


Figure 24 – Plancher à poutrelles intégrées. Différentes formes de poutres

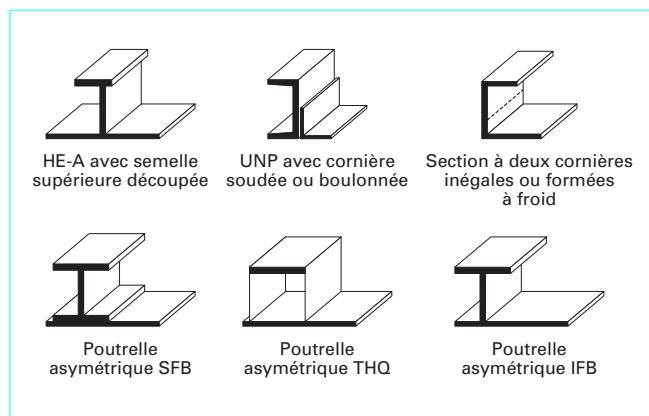


Figure 25 – Plancher à poutrelles intégrées. Poutrelles de rives

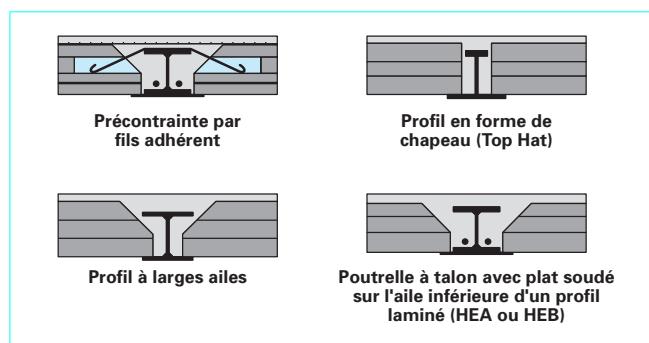


Figure 26 – Dispositions pour assurer l'appui de la dalle

En outre, il est recommandé d'étayer les poutrelles de rive avant la pose des éléments de dalle et le coulage du béton afin de limiter les rotations de torsion dues à l'excentrement du chargement.

1.2.3.2 Dalle

■ Dalles alvéolaires. Prédalles

La portée de la dalle est de 6 à 8 m. On coule le béton *in situ* jusqu'à l'épaisseur adéquate (généralement 5 cm d'enrobage de la semelle supérieure).

En phase de chantier, il faut impérativement apporter un soin particulier à la vérification de l'appui des dalles sur la semelle inférieure (de l'ordre de 60 à 100 mm) au prix d'une préparation adéquate de ces dalles ou d'un choix approprié de la section métallique (figure 26).

Outre l'appui, la liaison des dalles de part et d'autre de la poutre est à réaliser soigneusement afin de donner une homogénéité et un bon degré de robustesse du plancher pour s'opposer à l'effet de la déformation différentielle de flexion de la poutre à talon.

En rive, les dalles alvéolaires sont attachées aux poutrelles de rives afin de garantir l'effet diaphragme (figure 27).

La résistance au feu des dalles alvéolaires précontraintes seules dépend de deux paramètres principaux : l'épaisseur de la dalle et l'épaisseur de recouvrement des fils adhérents de précontrainte. Le tableau 8 [7] donne, à titre indicatif, la résistance à l'incendie de dalles alvéolaires seules.

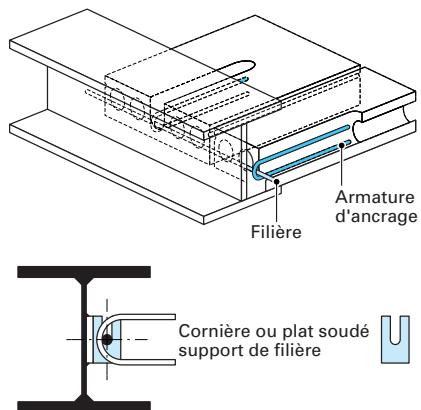
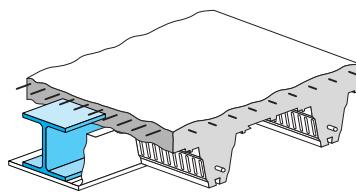


Figure 27 – Attaché de la dalle à la poutrelle de rive

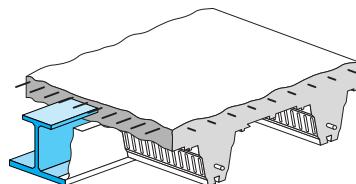
Tableau 8 – Exemples de performance de dalle alvéolaire à l'incendie

Dalle alvéolaire	Résistance au feu exigée (min)			
	30	60	90	120
Hauteur de dalle minimale .(mm)	100	120	140	160
Distance nominale (1) (mm)	20	30	40	50

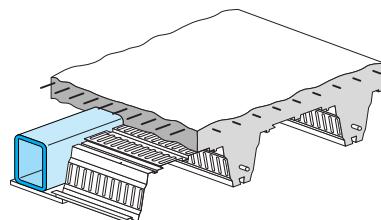
(1) Distance de l'axe des fils adhérents de précontrainte à la surface inférieure exposée.



Poutrelle avec plat additionnel



Poutrelle laminée dissymétrique



Tube avec plat additionnel pour poutrelle de rive

Figure 28 – Plancher à poutrelles intégrées et bac de grande hauteur

- d'un isolant acoustique linéaire en feutre posé sur la partie supérieure des cassettes ;
- d'une plaque de couverture ;
- d'un parquet en bois ou en anhydrite de gypse.

Cette disposition constructive donne des épaisseurs de plancher allant de 30 cm pour les petites portées à 45 cm pour les grandes portées. Le choix des éléments est fonction de la flèche maximale admise à mi-portée et de l'étude du comportement vibratoire du plancher.

L'espace interne du plancher est utilisé pour disposer :

— les compléments d'isolation thermique si nécessaire (laine minérale positionnée longitudinalement dans les cassettes, épaisseur 100 mm) ;

— les gaines électriques de faible puissance le long des poutres principales et longitudinalement dans certaines cassettes, des boîtiers électriques étant positionnés régulièrement (l'espace disponible en hauteur va de 60 mm pour les petites sections à 200 mm pour les grandes sections) ;

— la ventilation mécanique sur la partie supérieure des cassettes, entre l'isolation par la laine minérale et les tôles profilées transversales, des ouvertures circulaires permettant de régler le flux de ventilation.

Le poids du plancher est de l'ordre de 1,20 kN/m². La charge d'exploitation est de l'ordre de 3 kN/m² avec :

- une résistance thermique > 2,4 m² · K/W ;
- une isolation acoustique : $R_w = 50$ dB pour les bruits aériens, 60 dB pour les chocs ;
- enfin une résistance au feu de 30 min.

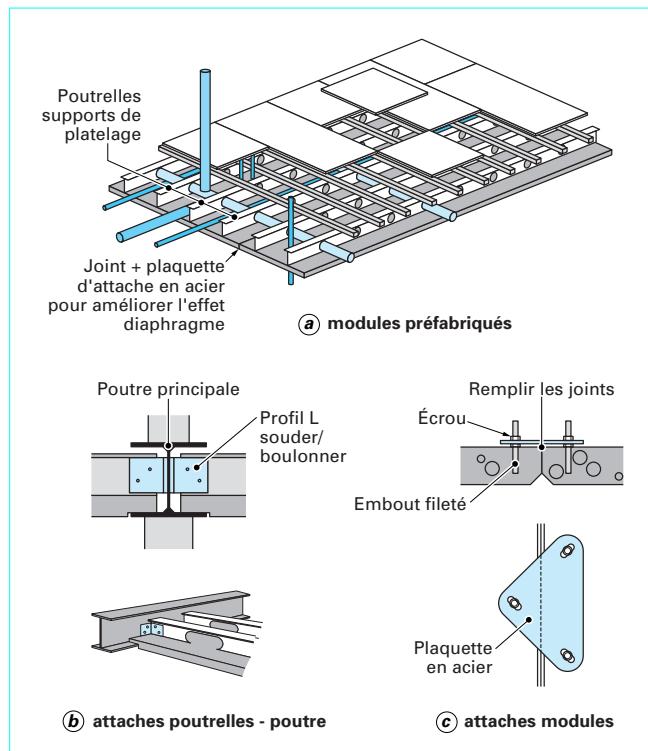


Figure 29 – Plancher sec. Système INFRA+.

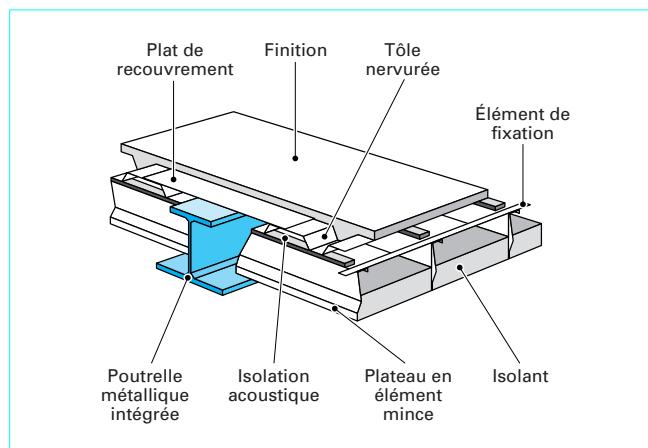


Figure 30 – Plancher sec. Système IDES de VAN DAM BV

1.2.5 Planchers. Synthèse

Le choix d'un système ne repose pas uniquement sur des considérations d'économie de métal, mais fait intervenir de multiples facteurs : économiques, fonctionnels et architecturaux. Parmi ces facteurs rappelons l'importance de :

- l'encombrement dans le plenum, passages de gaines, canalisations et autres réseaux : poutrelles ajourées, treillis, poutres Vierendeel/Gerber ;
- la hauteur globale du plancher ;

- la protection incendie : protection intégrée (plancher à poutrelles à talon) ou protection rapportée ;
- l'espace libre du plateau permettant une grande flexibilité dans l'occupation et la destination des locaux ;
- la rapidité d'exécution : plancher mixtes à bac collaborant ou à dalle alvéolaire sans étais.

Enfin, on retiendra que la **consommation de l'acier dans les planchers de bâtiments résidentiels ou de bureaux** est liée à la portée libre. Pour des portées de 4 à 18 m, la consommation peut varier de 15 à 40 kg/m².

2. Vibration et fréquence propre des planchers mixtes

Dans le domaine de **planchers mixtes de portée normale** (portée $L \leq 6$ m), les conditions déterminantes de calcul sont la résistance en flexion ou le contrôle des flèches. Pour les **planchers de grande portée** (6 à 18 m), le contrôle des vibrations induites par les occupants devient une condition déterminante sur le dimensionnement.

La vérification du comportement vibratoire d'un plancher sous l'action des usagers peut se faire soit par calcul de la réponse au chargement dynamique induit par les usagers, soit de façon forfaitaire en imposant une fréquence minimale de vibration de la structure de plancher.

Le seul critère d'une limite minimale de fréquence ne donne pas d'indication sur le niveau de la réponse du plancher en service. Il en résulte qu'un dimensionnement peut, tout en respectant certaines limites de fréquence minimales, aboutir à un plancher inconfortable en service ou à un dimensionnement trop conservateur. Cela a amené des auteurs [23] à proposer une méthode simple, d'application pratique pour un calcul manuel de dimensionnement des planchers mixtes vis-à-vis des vibrations. Cette méthode a été validée par des essais *in situ*.

Pour estimer si un plancher est acceptable au point de vue de son comportement avec la méthode de la référence [23], il devra suivre les étapes suivantes.

2.1 Déformée modale du plancher

Pour un plancher simple (figure 31a et b), constitué d'une dalle continue sur plusieurs poutrelles ou poutres secondaires, supportées à leur tour par des poutres principales, il faut considérer les deux déformées modales possibles :

- la déformée modale des poutres secondaires de plancher (figure 31c) ;
- la déformée modale des poutres principales de plancher (figure 31d).

2.2 Application des charges. Calcul des flèches. Fréquence fondamentale du plancher

Les charges (masses) à appliquer sont : le poids propre, les charges permanentes et 10 % des charges d'exploitation. Les essais *in situ* [23], ainsi que le comportement favorable des bâtiments calculés avec ce niveau de charge d'exploitation montrent le bien-fondé de cette proposition.

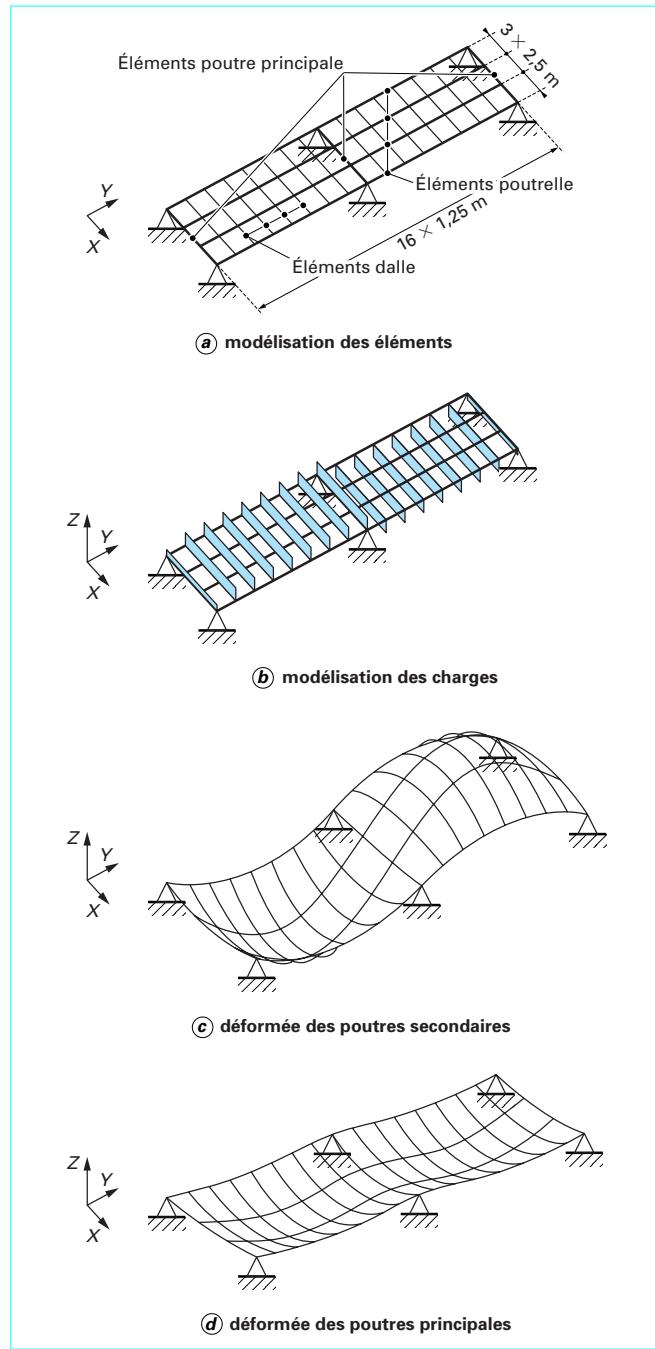


Figure 31 – Exemple de calcul de mode propre. Allure de la déformée du plancher

Les flèches sont à calculer avec l'inertie de la section mixte en considérant le béton non fissuré et en utilisant un coefficient d'équivalence instantané acier-béton ; pratiquement, ce coefficient est pris égal à 6.

On calcule facilement la fréquence fondamentale du plancher f_0 à partir du calcul de la fréquence fondamentale de chaque élément f_i .

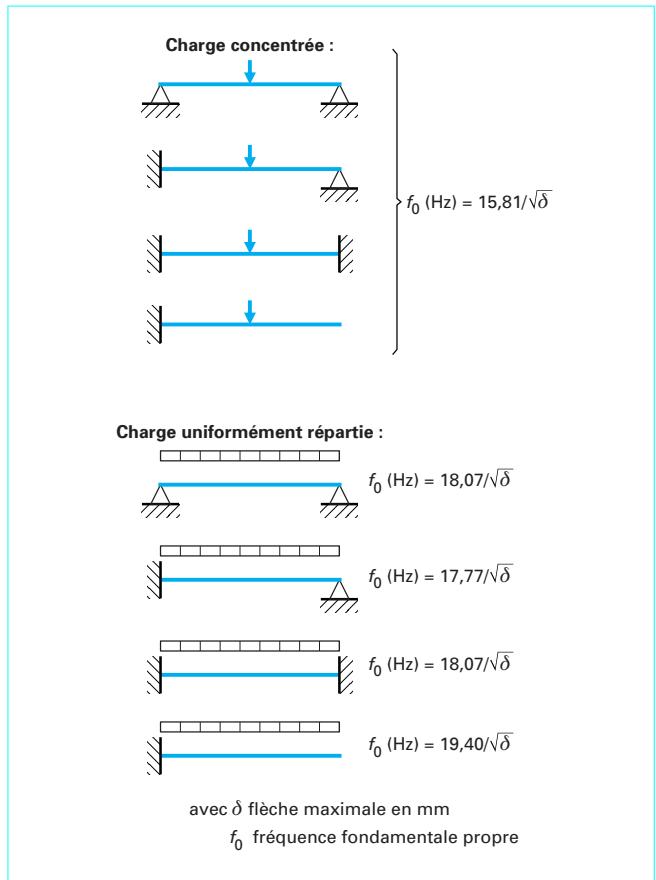


Figure 32 – Fréquence fondamentale propre de poutres de plancher

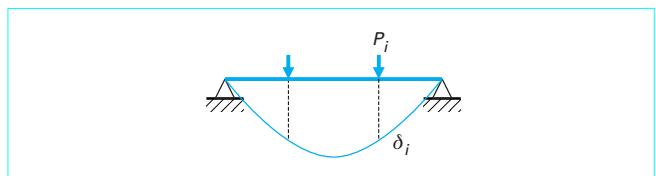


Figure 33 – Cas de charges concentrées

Dans les cas courants (poutre sur appuis simples à inertie constante), la figure 32 donne directement la fréquence propre en fonction de la flèche. Le projeteur calcule la flèche sous charges appropriées et, en se référant à la figure 32, il peut déduire facilement la fréquence fondamentale de la poutre en question.

Sous charges concentrées (figure 33), on appliquera la formule de Rayleigh. La période du mode fondamental est donnée par l'expression :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum |P_i| \delta_i^2}{g \sum P_i \delta_i}}$$

avec P_i charge concentrée (i),
 δ_i flèche au droit de la charge P_i .

Plusieurs méthodes sont données [22] [23] pour obtenir la fréquence du plancher à partir de la fréquence fondamentale de chaque élément.

Tableau 9 – Valeurs des dimensions L_{eff} et S utilisées pour déterminer la masse effective du plancher

Tracé indicatif du plancher		Conditions qualifiantes	L_{eff} (m)	S (m)
Forme modale gouvernée par le mouvement des poutres secondaires	Cas 1 	$RF_{\text{poutre principale}} < 0,2$	L	$S^* \text{ mais } \leq W$
		$RF_{\text{poutre principale}} > 0,2$	L	Plus grand que S^* ou L_m mais $\leq W$
Forme modale gouvernée par le mouvement des poutres principales	Cas 2 	$\ell = L$	$2L$	Idem Cas 1 ci-dessus
		$0,8L < \ell < L$	$1,7L$	
		$\ell < 0,8L$	L	
Forme modale gouvernée par le mouvement des poutres principales	Cas 3 	$RF_{\text{poutre principale}} < 0,6$	$2L$	W
		$RF_{\text{poutre principale}} > 0,6$	$L^* \text{ mais } \leq L_{max}$	
Forme modale gouvernée par le mouvement des poutres principales	Cas 4 	$W_2 = W_1$		$2W_1$
		$W_2 > 0,8W_1$	Idem Cas 3 ci-dessus	$1,7W_1$
		$W_2 < 0,8W_1$		W_1
$RF_{\text{poutre principale}}$	flexibilité relative de la poutre principale (la flèche de la poutre principale comparée à la flèche totale utilisée dans le calcul de la fréquence fondamentale).			
$S^* \text{ (m)}$	largeur effective du plancher participant à la vibration, calculée à partir de la rigidité effective de la dalle, donnée par :			
		$S^* = 4,5 \left(\frac{EI_1}{mbf_0^2} \right)^{1/4}$		
	avec EI_1 (Nm ² par mètre de largeur) rigidité dynamique en flexion de la dalle.			
$L^* \text{ (m)}$	portée effective de la poutre secondaire participant à la vibration, calculée à partir de la rigidité effective de la poutre mixte donnée par :			
		$L^* = 3,8 \left(\frac{EI_b}{mbf_0^2} \right)^{1/4}$		
	avec EI_b (Nm ²) rigidité dynamique en flexion de la poutre mixte secondaire, b (m) espacement des poutres secondaires.			
$W \text{ (m)}$	largeur de la dalle de plancher considérée.			
$L_m \text{ (m)}$	portée de la poutre principale.			
$L_{max} \text{ (m)}$	longueur totale de la poutre secondaire lorsqu'elle est considérée comme agissant en continuité.			

Lorsque les portées adjacentes sont à peu près égales, une méthode simple consiste à calculer la flèche de chaque élément à partir de ses conditions d'appuis et de chargement et à calculer la fréquence fondamentale du plancher par l'expression :

$$f_0 = \frac{18}{\sqrt{\delta}}$$

2.3 Planchers de basse fréquence

On se limite ici aux cas courants de planchers mixtes de bâtiment de portée 8 à 18 m.

Ces planchers affichent une réponse résonante et la fréquence fondamentale se situe entre 3,0 et 9,6 Hz (planchers de basse fréquence).

Il est recommandé d'adopter une valeur de 3,6 Hz pour la limite inférieure de la fréquence minimale du mode fondamental.

2.4 Calcul de la rigidité modale

Dans le domaine de basse fréquence et en outre pour appliquer le calcul manuel simplifié, il faut s'assurer que :

$$I_1 L / I_b \geq 0,132$$

avec I_1 moment d'inertie de la dalle par mètre de largeur,
 I_b moment d'inertie de la section de la poutre secondaire ou de la poutrelle,
 L portée de la poutrelle.

Il faut cependant noter que lorsque $I_1 L / I_b < 0,132$, ces recommandations de calcul ne sont plus appropriées car elles aboutissent à une estimation très sécuritaire de l'accélération maximale.

La **rigidité modale effective** peut être calculée à l'aide de l'expression suivante :

$$k = 4\pi^2 f_0^2 \frac{m S L_{eff}}{C_s}$$

avec f_0 fréquence fondamentale du système de plancher,
 m masse du plancher [égale à la somme de la masse propre et de la masse de la charge variable (kg/m^2), multipliée par un facteur de combinaison de l'action variable $\psi_1 = 0,1$],
 S largeur effective du plancher (m),
 L_{eff} portée effective de la poutre secondaire (m),
 C_s rapport de la valeur $m S L_{eff}$, correspondant au facteur de masse modale, sur la masse modale effective :

$$C_s = \frac{m S L_{eff}}{M}$$

Le tableau 9 (extrait de la référence [23]) donne les valeurs à considérer pour S et L_{eff} (C_s peut généralement être pris égal à 4 pourvu que $I_1 L / I_b \geq 0,132$).

2.5 Calcul de l'accélération maximale

Un plancher avec une fréquence fondamentale comprise entre 3 et 9,6 Hz (la limite supérieure est définie par le quatrième composant harmonique d'une personne marchant à 2,4 Hz) est supposé afficher une réponse résonante aux activités de marche. Dans ces circonstances, l'**accélération maximale** devrait être calculée à l'aide de l'expression suivante :

$$a_{max} = \frac{4\pi^2 f_0^2 P \alpha_n}{k^2 \zeta} \quad (1)$$

avec f_0 fréquence fondamentale du plancher,
 P poids de la personne pris comme ayant une amplitude de 745,6 N (76 kg),
 α_n coefficient de Fourier du $n^{\text{ième}}$ composant harmonique de l'activité de marche (tableau 10),
 k rigidité modale calculée à l'étape précédente,
 ζ amortissement (voir les valeurs recommandées dans le tableau 11).

Tableau 10 – Valeurs de dimensionnement des coefficients de Fourier pour les activités de marche

Taux d'activité	(Hz)	1,6 à 2,4
Coefficient de Fourier :		
— du premier harmonique α_1	0,40	
— du second au quatrième harmonique α_2 à α_4	0,10	
Densité d'occupation	(personne)	1,0

Tableau 11 – Valeurs recommandées pour l'amortissement ζ pour estimer la réponse des systèmes de plancher mixte

Type de plancher	ζ (%)
Planchers complètement nus ou avec peu de mobilier	1,5
Planchers normaux, paysagés, avec mobilier	3,0
Planchers avec partitions (1)	4,5

(1) Le concepteur devra s'assurer que les partitions sont correctement placées pour atténuer les modes pertinents de vibration (les lignes de partition sont perpendiculaires aux principaux éléments vibratoires de la déformée modale critique trouvée à l'étape décrite dans le paragraphe 2.1).

Dans le cas spécifique d'une fréquence fondamentale supérieure ou égale à 3,60 Hz, il suffit de considérer une seule valeur pour le coefficient de Fourier. L'équation (1) peut alors être simplifiée pour calculer l'accélération maximale :

$$\alpha_{max} = \frac{0,1 P C_s}{2 \zeta m S L_{eff}}$$

Les lecteurs peuvent se reporter à la référence [23] pour les calculs concernant les planchers à haute fréquence ($> 9,6$ Hz).

2.6 Critères d'acceptation

Il est proposé de déterminer l'acceptabilité d'un plancher sur la base des limites d'accélération maximale données par la norme NF EN 1991-3 (ENV 1991-5) [24]. Les courbes de dimensionnement pour les bâtiments soumis à des activités de marche sont présentées à la figure 34 et décrites dans le tableau 12.

Tableau 12 – Limites au mouvement dynamique,
d'après la norme NF EN 1991-3 (ENV 1991-5) [24]

Courbe	Description du niveau de perception	Présence de personnes dans l'immeuble	Évaluation de l'influence globale sur les immeubles
G	Non perceptible	–	Aucune influence
F	À peine perceptible	Longue durée admissible dans les immeubles d'habitation	Aucune influence
E	Perceptible	Courte durée admissible dans les immeubles d'habitation	Aucune influence sur les immeubles ordinaires

Les planchers dont l'accélération maximale est inférieure à la valeur donnée par la courbe G, de la figure 34, conviennent pour des tâches techniques nécessitant une concentration prolongée, y compris des opérations de précision sur des écrans d'ordinateur. Ceux dont l'accélération maximale est inférieure à la courbe F conviennent pour des activités de bureau ordinaires, y compris l'utilisation d'ordinateurs pour des activités de manipulation de texte. Enfin, les planchers dont l'accélération maximale théorique

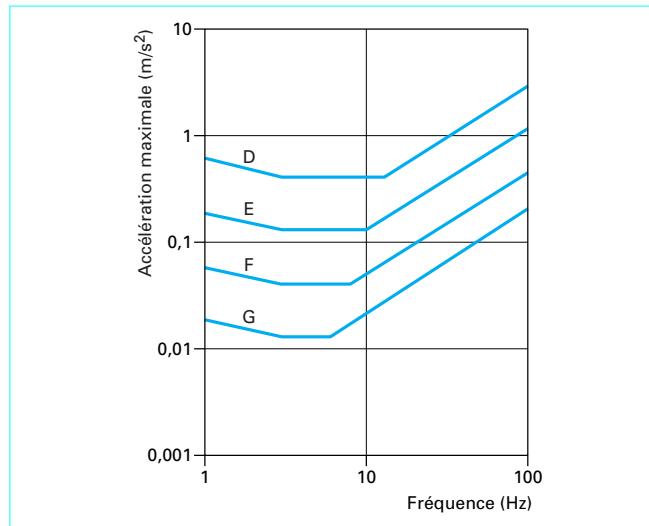


Figure 34 – Limites d'accélération RMS admissible maximale,
d'après NF EN 1991-3 (ENV 1991-5) [24]

est inférieure à la courbe E sont accessibles à un grand nombre de personnes, avec des distractions visuelles et auditives se produisant en même temps que les vibrations.

Références bibliographiques

- [1] Eurocode. – Actions sur les structures. Partie 1-1 : Actions générales - Poids volumiques, poids propres et charges d'exploitation pour les bâtiments. NF EN 1991-1-1 (indice de classement : P 06-111-1), et son annexe nationale, mars 2003. <http://www.afnor.fr>
- [2] Eurocodes structuraux. – Bases de calcul des structures. NF EN 1990-1-1 (indice de classement : P 06-100-1), mars 2003. <http://www.afnor.fr>
- [3] Construction métallique - Eurocode 3 (ENV 1993). – Calcul des structures en acier et document d'application nationale. Partie 1.1 : règles générales et règles pour les bâtiments EC3 DAN. Norme P22-311, sept. 2002. <http://www.afnor.fr>
- [4] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) - Groupe Spécialisé n° 3 « Structures, ossatures, charpentes ». – *Avis techniques plancher à bac collaborant*. Ex. 3/95-264, 3/95-260.
- [5] Construction mixte acier-béton - Eurocode 4 (ENV 1994). – Conception et calcul des structures mixtes acier-béton et document d'application nationale. Partie 1.1 : règles générales et règles pour les bâtiments EC4 DAN. Norme P22-391, sept. 1994. <http://www.afnor.fr>
- [6] *Guide to Good Practice of Precast Hollow Core Slabs*. Fédération internationale de la précontrainte (FIP) (1998).
- [7] Convention européenne de la construction métallique (CECM) et International Prestressed Hollowcore Association (IPHA). – *Recommandations pour l'utilisation des dalles alvéolées précontraintes avec poutres incorporées*. Revue Construction métallique n° 4-1998.
- [8] Pr EN 1168 – *Prestressed Hollow Core Elements* (1996).
- [9] BITAR (D.). – *Vérification à l'état limite ultime des poutres métalliques avec ouvertures d'âme - Exemples de calcul et recommandations*. Revue Construction métallique n° 1-1998.
- [10] BITAR (D.) et MAITRE (P.). – *Poutres mixtes de bâtiment avec ouverture isolée dans l'âme - Démarche de vérification et exemple de calcul*. Revue Construction métallique n° 4-2001.
- [11] Eurocode 2 (ENV 1992). – Conception et calcul des structures en béton et document d'application nationale. Partie 1.1 : règles générales et règles pour les bâtiments - EC2 DAN. Norme P18-711, déc. 1992. <http://www.afnor.fr>
- [12] *Construction métallique et mixte acier-béton*. APK - tome 1 et tome 2, Ouvrage Collectif sous la direction de J. BROZZETTI et P. BOURRIER (1995).
- [13] BITAR (D.) et CHABROLIN (B.). – *Unpropped Large Span Floor. Final Report*. European Commission - Technical Steel Research EUR 18564 EN (1998).
- [14] Hoesch Siegerlandwerke GmbH - Geisweider Strasse 13-D-57078 Siegen. <http://www.hsws.de>
- [15] CHIEN (E.Y.L.) et RITCHIE (J.K.). – *Design and construction of composite floor systems*. Canadian Institute of Steel Construction (1984).
- [16] BJORHØVDE (R.) et ZIMMERMAN (T.J.). – *Some Aspects of stub-Girder Design*. Cana-dian Structural Engineering Conference, Proceedings (1980).
- [17] Convention européenne de la construction métallique (CECM). – *Multi-Storey-Buildings in Steel. Design Guide for Slim Floors with Built-in-beams* - Publication n° 83.
- [18] Steel Construction Institute (SCI). – *Design of slimflor. Fabricated beams using deep composite decking*. D. L. MULLETT, R. M. LAWSON - P 248.
- [19] Steel Construction Institute (SCI). – *Slimflor Construction using deep decking*. D. L. MULLETT, R. M. LAWSON - P 127.
- [20] PreFab Limburg BV. – INFRA+ SYSTEM - Kelperheide 50- NL-6037 SZ Kelpen-Oler. <http://www.prefab-limburg.nl>
- [21] VAN DAM BV - IDES deck. – Fabriek van Plaatwerken VAN DAM BV-Dirk H. GROENEVELD- P.O. Box 3003-NL-2980 DA Ridderkerk. <http://www.van-dam.nl>
- [22] BITAR (D.). – *Exemple de calcul de la fréquence propre d'un plancher mixte à bac collaborant*. Revue Construction métallique n° 1-2001.
- [23] HICKS (S.-J.), BROZZETTI (J.), REMY (B.) et LAWSON (R.-M.). – *Dimensionnement des planchers mixtes acier-béton vis-à-vis des vibrations*. Revue Construction métallique n° 1-2003.
- [24] Eurocode 1 (ENV 1991-5). – Bases de calcul et actions sur les structures. Partie 5 : actions induites par les ponts roulants et autres machines. Norme NF EN 1991-3 (indice de classement : P06-130PR), janv. 2001. <http://www.afnor.fr>