

Conception et calcul des dalles mixtes acier-béton

par **Michel CRISINEL**

*Ingénieur civil diplômé de l'École polytechnique fédérale de Lausanne
Chargé de cours à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse*

1. Conception des planchers mixtes à tôles nervurée	C 2 567 - 2
1.1 Planchers de bâtiment à ossature en acier	— 2
1.2 Dalles mixtes	— 4
1.3 Types de tôles nervurées	— 4
1.4 Connexion entre la tôle et le béton	— 5
1.5 Situations à considérer	— 5
2. Calcul de la tôle nervurée	— 6
2.1 Analyse pour les sollicitations (détermination des efforts intérieurs).....	— 6
2.2 Calcul de la résistance des sections	— 6
2.3 Vérification de la tôle nervurée.....	— 6
3. Calcul de la dalle mixte	— 6
3.1 Analyse pour les sollicitations (détermination des efforts intérieurs).....	— 6
3.2 Calcul de la résistance des sections	— 7
3.3 Vérification des états limites ultimes	— 11
3.4 Méthode de la connexion partielle (méthode alternative)	— 12
3.5 Vérification des états limites de service.....	— 12
3.6 Vérification du comportement vibratoire.....	— 14
4. Exemple numérique	— 15
4.1 Schéma statique.....	— 15
4.2 Analyse	— 15
4.3 Calcul des efforts intérieurs	— 16
4.4 Résistances en section.....	— 16
4.5 État limite de service, vérification des flèches.....	— 17
4.6 État limite de service, vérification de l'ouverture des fissures du béton ..	— 18
4.7 État limite de service, vérification des vibrations.....	— 18
Pour en savoir plus	Doc. C 2 567

Une dalle mixte est un élément de construction des bâtiments métalliques à ossature mixte. Elle est composée d'une tôle nervurée sur laquelle on coule une dalle en béton comportant un léger treillis d'armature destiné à limiter la fissuration du béton due au retrait et aux effets de la température. Dans ce type de dalles (appelées aussi planchers collaborants), la tôle nervurée sert de plate-forme de travail lors du montage, de coffrage pour le béton et d'armature inférieure pour la dalle après durcissement du béton. Elle peut également servir de contreventement horizontal provisoire lors du montage de la structure porteuse du bâtiment, à condition qu'elle soit fixée à la poutraison de façon adéquate.

Cet article comprend une partie consacrée à la conception des planchers mixtes, ainsi qu'une partie dédiée à l'analyse et au dimensionnement des tôles et des dalles mixtes proprement dites. Le stade de construction, où seule la tôle contribue à la résistance, et le stade définitif, où la dalle constitue un élément mixte grâce à la contribution du béton durci, sont clairement différenciés. Les méthodes exposées sont en conformité avec les normes européennes actuelles sur le calcul des structures porteuses, les « Eurocodes structuraux » (normes EN 1991 à EN 1994).

1. Conception des planchers mixtes à tôle nervurée

1.1 Planchers de bâtiment à ossature en acier

Le plancher, constitué de la **poutraison** et de la **dalle** ainsi que des revêtements inférieur (faux-plafond) et supérieur (isolation, chape, revêtement de sol), a pour **fonction structurale principale** de supporter les **forces verticales** qui lui sont appliquées et de les transmettre aux appuis (les poteaux). Une **fonction structurale secondaire** importante est celle que les planchers jouent dans la transmission des **forces horizontales** : ils conduisent aux contreventements verticaux ou au noyau central les forces du vent et des séismes et agissent ainsi comme contreventement horizontal de la structure porteuse du bâtiment.

Leur **fonction protectrice** consiste à assurer les protections contre le **bruit** (isolation phonique), le feu (fonction coupe-feu), la **chaleur** ou les différences de température (isolation thermique) et l'**humidité** (étanchéité, pare-vapeur). C'est aussi dans l'épaisseur du plancher que passent les conduites horizontales destinées à ali-

menter le bâtiment et l'étage concerné en fluides et énergie pour les besoins du chauffage, de la ventilation, du sanitaire, de l'électricité et de la télématique. Enfin, c'est le plancher qui délimite optiquement et esthétiquement les faces horizontales supérieure et inférieure des locaux.

Du point de vue de sa **construction**, un plancher est composé de **trois parties** (figure 1) :

- le **système porteur**, comprenant la poutraison et la dalle ;
- la **partie supérieure**, comprenant isolation, étanchéité, chape et revêtement de sol ;
- la **partie inférieure**, comprenant le plafond (faux-plafond ou revêtement de la surface des poutres et de la dalle) et l'espace vide entre les poutres.

Les planchers sont des éléments répétitifs dans la structure d'un bâtiment élevé ; il est donc avantageux de prévoir des planchers de faible épaisseur, de faible poids propre et de montage rapide.

La **poutraison** est un réseau de poutres métalliques horizontales qui transmet aux poteaux les forces qui sollicitent la dalle. Ce réseau, le plus souvent orthogonal, est constitué des poutres secondaires (ou **solives**), en général parallèles entre elles, qui reçoivent directement les charges verticales de la dalle et les transmettent aux poutres primaires (ou **sous-poutres** ou **sommiers**)

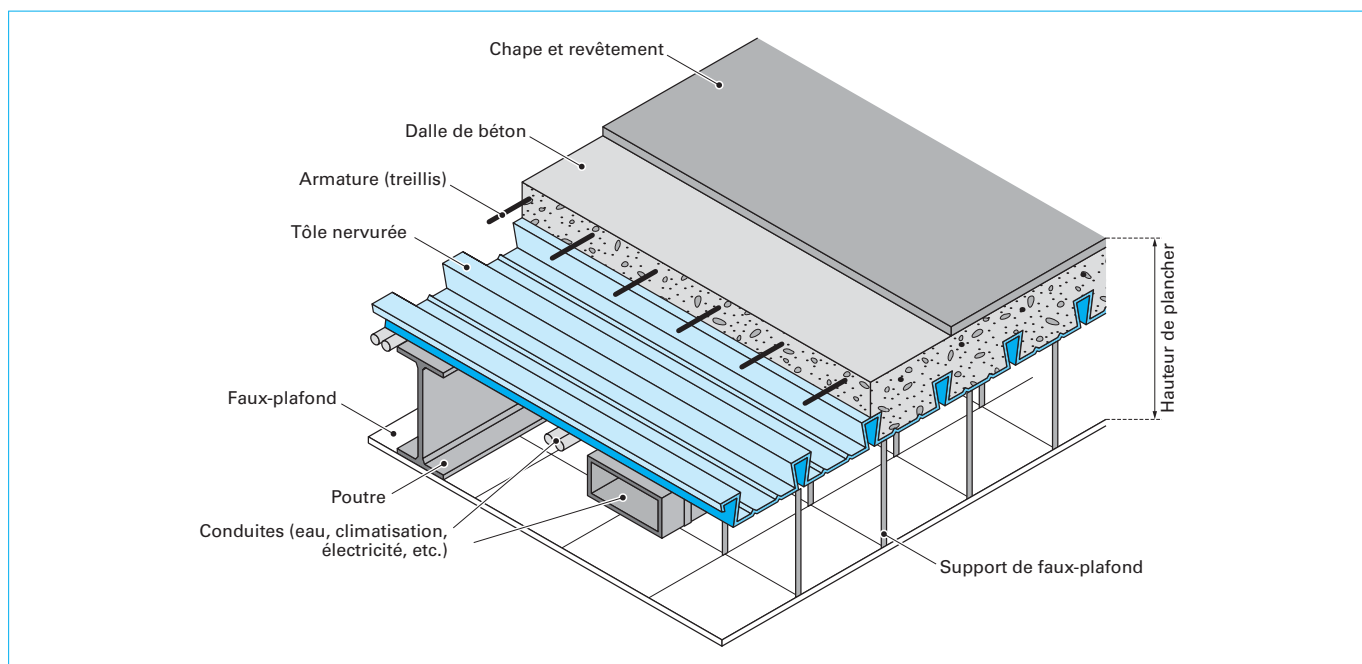


Figure 1 – Composition d'un plancher

perpendiculaires qui s'appuient sur les poteaux. Dans certains cas, les sous-poutres s'appuient sur un troisième niveau de poutres (les **poutres maîtresses**) qui, elles seules transmettent les forces aux poteaux. Cela permet d'augmenter les portées et de diminuer le nombre de poteaux. La conception de la poutraison détermine ainsi la disposition et l'espacement entre les éléments fléchis en fonction de la position des poteaux. Elle permet de définir les types les plus courants de planchers à poutres métalliques.

Une poutraison à **deux niveaux de poutres** (figure 2) permet de réaliser des grands espacements de poteaux dans les deux directions du plan. On évite ainsi les rangées serrées de poteaux situés en façade ou dans les cloisons intérieures. La trame n'est pas obligatoirement régulière, ce qui laisse une grande liberté d'aménagement.

Dans les bâtiments à ossature métallique, la **dalle** est souvent réalisée en béton armé ou en construction mixte avec tôle nervurée d'acier. Plus rarement, la dalle en béton armé repose directement sur les poteaux, sans poutres métalliques. Cette conception est alors proche de celle des bâtiments en béton armé.

Lorsque la dalle mixte est liée à la poutraison par des connecteurs, l'ensemble constitue un **plancher mixte** acier-béton (figure 3).

Dans un tel système, la dalle en béton remplit, en travée, la fonction de membrure supérieure comprimée alors que la poutre métallique située dans la partie inférieure est essentiellement tendue. Dans les zones d'appui des poutres mixtes, la participation de la dalle à la résistance est obtenue par une armature supérieure capable de reprendre les efforts de traction, la poutre métallique étant alors partiellement comprimée.

Pour obtenir l'effet mixte souhaité, c'est-à-dire une collaboration parfaite entre l'acier et le béton, il faut que la liaison entre la poutre et la dalle soit réalisée de façon à transmettre les efforts rasants et limiter les glissements qui se développent à l'interface. Sans liaison, les profils métalliques doivent supporter à eux seuls toutes les charges. Par contre, si une connexion est mise en place, on

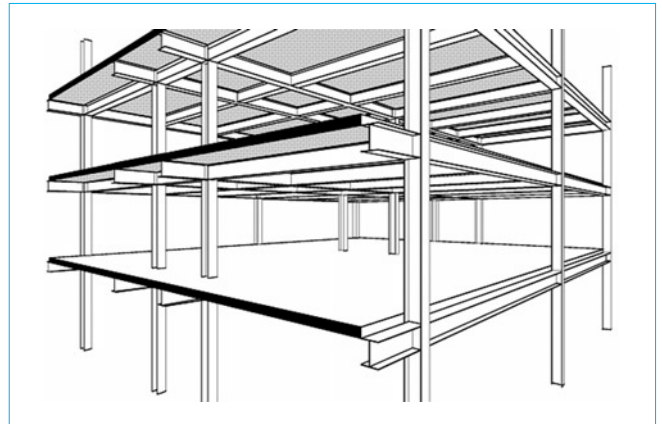


Figure 2 – Plancher à deux niveaux de poutres

réalise une poutre mixte dont la résistance et la rigidité sont sensiblement accrues.

Dans les bâtiments, la **connexion** des poutres mixtes est assurée par des goujons soudés sur l'aile supérieure des poutres métalliques du plancher. Les goujons sont des pièces cylindriques en acier comportant une tête. Il existe également des connecteurs en forme d'équerres et fixés par des clous. Ce nouveau type de connexion est particulièrement bien adapté au cas des dalles mixtes avec tôle nervurée, car ils peuvent être facilement fixés à travers la tôle. Le soudage des goujons présente en effet souvent des difficultés liées à l'alimentation en courant électrique, à la présence d'humidité et à la présence d'un revêtement contre la corrosion de la poutre (peinture) et de la tôle (zingage).

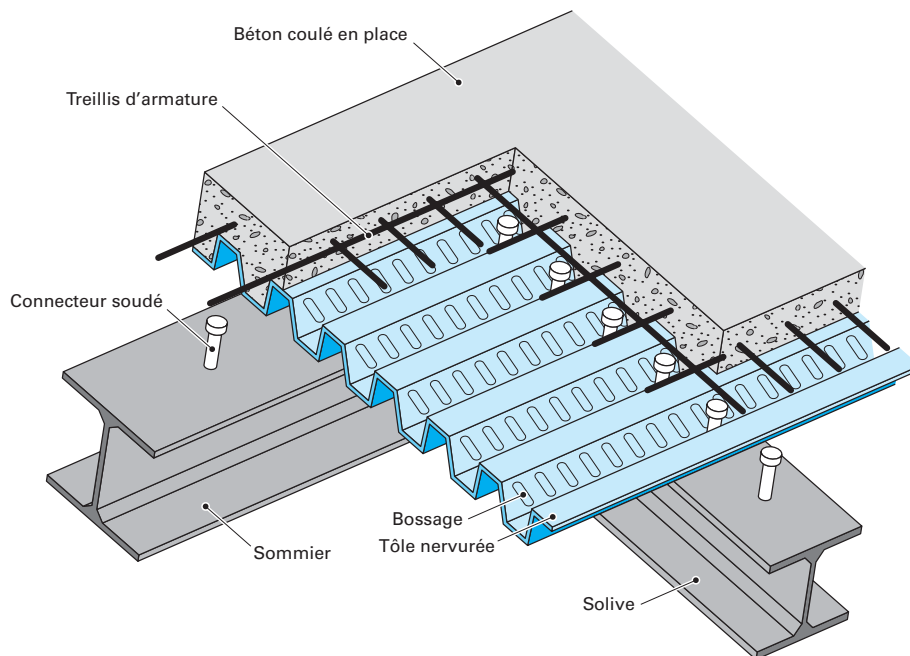


Figure 3 – Plancher mixte avec connecteurs acier-béton

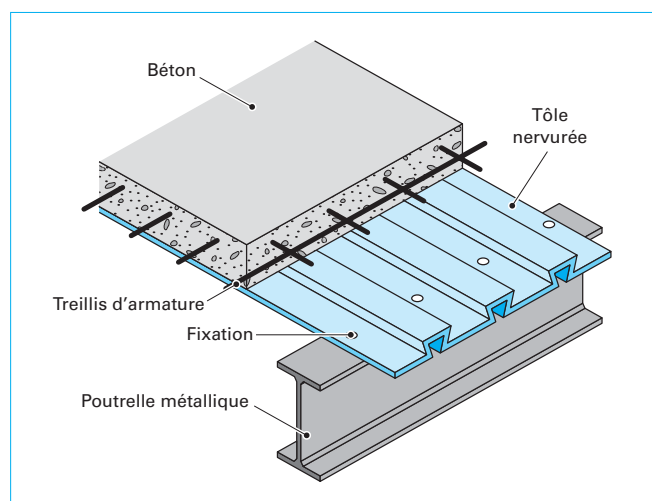


Figure 4 - Dalle mixte avec tôle nervurée

1.2 Dalles mixtes

Une **dalle mixte** (figure 4) est composée d'une **tôle nervurée** sur laquelle on coule une **dalle en béton** comportant un **léger treillis d'armature** destiné à limiter la fissuration du béton due au retrait et

aux effets de la température. Dans ce type de dalle, la tôle nervurée a plusieurs fonctions. Elle sert notamment :

- de plate-forme de travail pendant la construction de l'ouvrage ;
- de coffrage lors du bétonnage de la dalle ;
- d'armature inférieure de la dalle mixte.

Elle peut également servir de contreventement horizontal provisoire lors du montage, à condition qu'elle soit fixée à la poutraison de façon adéquate. Le béton sert à la création du plan horizontal et à la reprise des efforts de compression se développant dans l'élément mixte.

1.3 Types de tôles nervurées

Les tôles nervurées, appelées aussi plaques nervurées dans l'**Eurocode 4** (voir [Doc. C 2 567]), doivent posséder une capacité portante et une rigidité suffisantes pour servir de coffrage, si possible sans étai, ainsi qu'un profil particulier (forme de nervures, bossages) pour garantir une bonne liaison mécanique entre l'acier et le béton. La tôle est fixée sur les poutres métalliques qui la supportent par des clous scellés par percussion ou par des vis autotaraudeuses ou autoperceuses.

Le **matériau** de base servant à la fabrication des plaques nervurées à froid est la tôle d'acier galvanisée double face et livrée sous forme de bobines. La couche de zinc, barrière physique contre les attaques de la corrosion atmosphérique, est obtenue par galvanisation à chaud dans des lignes traitant de larges bandes en continu (immersion dans un bain de zinc en fusion).

Il existe un très grand nombre de types de tôles nervurées utilisées dans la construction des dalles mixtes (figure 5). Ces tôles se

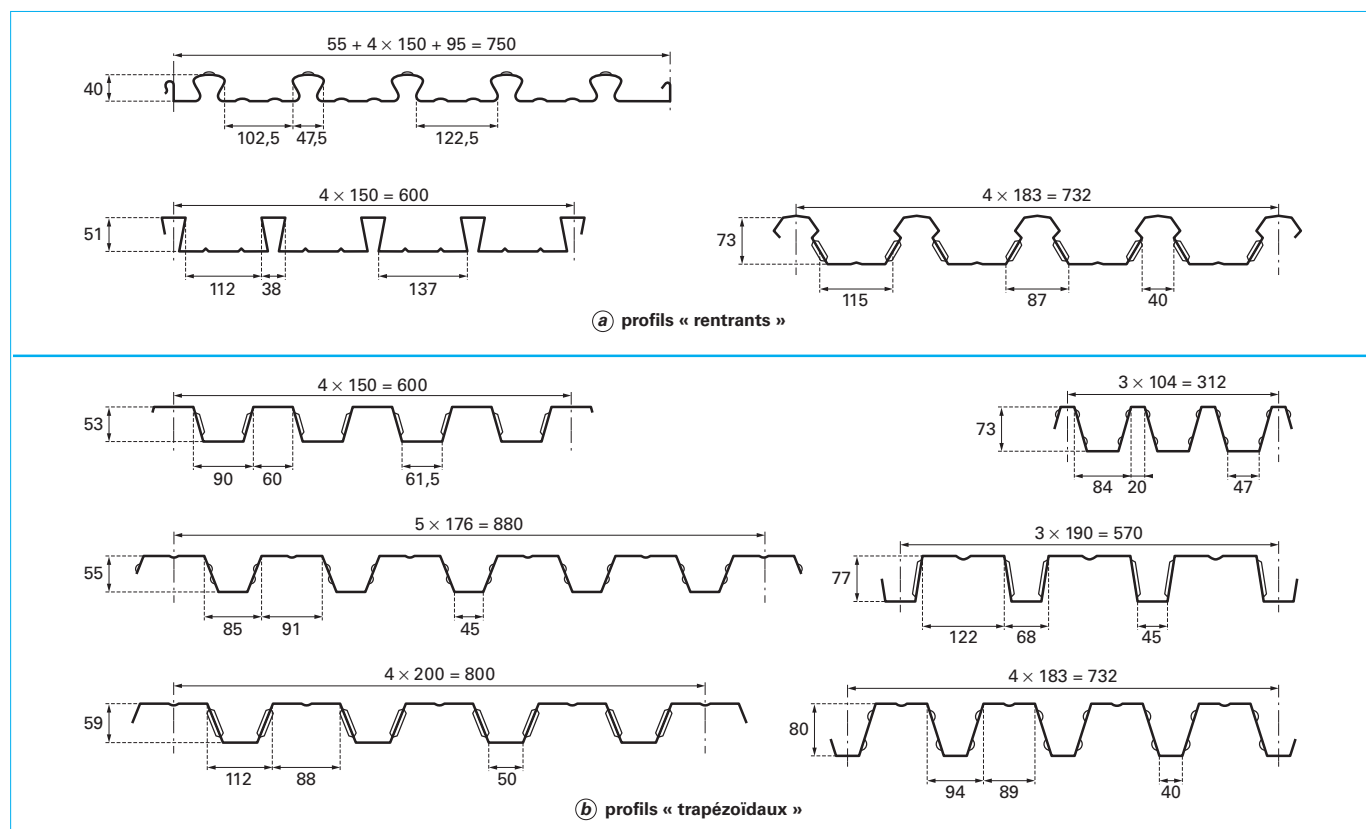


Figure 5 - Exemples de tôles nervurées utilisées pour les dalles mixtes

différencient par la forme, la hauteur et l'entraxe des nervures, par la largeur des plaques, par leur mode de recouvrement latéral, par les moyens de raidissement des éléments plans constituant le profil et enfin par les moyens de connexion mécanique assurant la liaison avec le béton.

L'épaisseur nominale des tôles se situe entre 0,75 et 1,50 mm, mais en pratique, les épaisseurs utilisées ne dépassent pas 1,0 mm. La couche de zinc représentant une épaisseur d'environ 0,02 mm sur chaque face, l'épaisseur nette de la tôle est donc égale à l'épaisseur totale moins 0,04 mm. La hauteur des profils se situe entre 38 et 80 mm. Cette grande variété de tôles nervurées permet de satisfaire les exigences relatives à la charge, la portée, l'isolation phonique et la protection contre le feu pour la plupart des dalles de bâtiment.

1.4 Connexion entre la tôle et le béton

Pour assurer la liaison acier-béton, la tôle nervurée doit être capable de transmettre le flux de cisaillement (l'effort rasant) à l'interface entre la tôle et le béton. Cette connexion mécanique peut être réalisée par un ou plusieurs des moyens suivants (figure 6) :

- par la forme *rentrante* des nervures (plus large à son sommet qu'à sa base), créant une liaison par frottement (figures 6a et 6b) ;
- par des bossages pratiqués dans les âmes ou les ailes de la tôle (figure 6c) ;
- par des ancrages disposés à l'extrémité des dalles, constitués de goujons soudés ou d'équerres clouées sur les poutres sous-jacentes (figures 6d et 6e) ;
- par déformation des nervures (figure 6f).

En cas de connexion par goujons, ceux-ci peuvent être soudés soit préalablement en usine (auquel cas la tôle doit être préparée), soit sur le chantier à travers la tôle.

Les dalles mixtes peuvent être apparentées aussi bien à des dalles en béton armé qu'à des poutres mixtes acier-béton.

Dans les dalles en béton armé, la connexion est obtenue par l'adhérence des armatures tendues dans le béton, due au profilage spécial des barres. Cette adhérence, contrôlée par des essais, est telle qu'elle correspond à la résistance à la traction des armatures. Les dalles en béton armé peuvent ainsi toujours développer leur pleine résistance à la flexion.

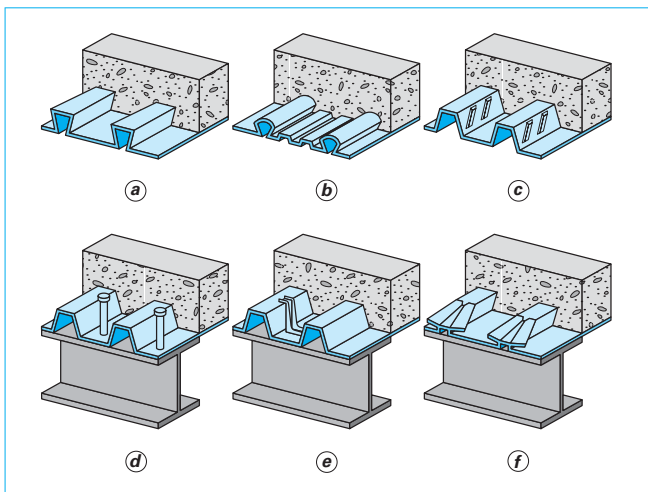


Figure 6 – Types de connexion entre tôle nervurée et béton

Dans les poutres mixtes, la solidarisation est réalisée par des connecteurs fixés à l'aile supérieure du profilé métallique. Cette connexion peut être dimensionnée de façon que la poutre mixte atteigne sa résistance ultime à la flexion (connexion totale). Si le nombre de connecteurs est inférieur (connexion partielle), la résistance ultime à la flexion est inférieure à la résistance en connexion totale et dépend essentiellement du nombre de connecteurs, de la forme du diagramme charge-glissement des connecteurs, de la portée de la poutre et du procédé de construction.

La dalle mixte avec tôle nervurée se situe entre ces deux systèmes. D'une part, les tôles comportent des bossages permettant de les assimiler à des barres d'armature. D'autre part, la tôle est un élément à rigidité flexionnelle similaire aux poutres métalliques. Cependant, la tôle nervurée, de même que ses bossages, sont déformables. Ainsi, l'effet d'enrobage est moindre que pour une barre d'armature plutôt considérée indéformable, d'autant plus que le béton n'est situé que d'un seul côté de la tôle. Ces phénomènes de déformation de la tôle signifient que la connexion dépend de nombreux paramètres. Lors d'un essai de charge d'une dalle mixte, on observe que la rupture peut se produire soit par flexion, ce qui correspond à une connexion totale, soit par cisaillement longitudinal, ce qui correspond à une connexion partielle.

1.5 Situations à considérer

Une dalle mixte composée d'une tôle nervurée et de béton a la particularité de comporter deux états structuraux très distincts (Eurocode 4) : l'état lors du bétonnage (le stade de construction), où seule la tôle résiste aux charges, et l'état d'utilisation (le stade définitif), où le béton est lié à l'acier, le tout constituant alors un profil mixte acier-béton.

1.5.1 Stade de construction (tôle nervurée utilisée comme coffrage)

Les vérifications des états limites ultimes et de service doivent être effectuées pour la tôle nervurée agissant comme coffrage du béton frais. L'étayage doit être considéré dans cette situation. La tôle est soumise aux actions suivantes (Eurocode 1) :

- poids propre des tôles nervurées g_p ;
- poids du béton frais g_c ;
- charges de construction q_m ;
- charge d'entreposage, si nécessaire, q .

Le poids du béton frais, qui représente la charge prépondérante, doit être estimé en fonction de son épaisseur théorique figurant sur les plans d'exécution. Il faut tenir compte, si nécessaire, de l'effet de mare, soit du poids du surplus de béton dû à la flèche w_g (m) de la tôle sous l'effet du poids du béton frais, si cette flèche dépasse le dixième de l'épaisseur totale de la dalle. Ce poids g_c^* (kN/m) est égal à :

$$g_c^* = 0,7 w_g \rho_c \quad (1)$$

avec ρ_c poids spécifique du béton (en kN/m³).

Les charges de construction tiennent compte du poids des ouvriers et de l'installation de bétonnage, ainsi que d'éventuels chocs ou vibrations susceptibles de se produire durant la construction. Selon l'Eurocode 1, partie 1.6, on peut admettre comme valeur représentative des charges de construction q_m (y compris tout surplus de béton) une charge de 1,5 kN/m² répartie sur une surface de 3 m × 3 m et de 0,75 kN/m² sur le reste de la surface de coffrage.

1.5.2 Stade définitif (dalle mixte)

Les vérifications des états limites ultimes et de service doivent être effectuées pour la dalle mixte après durcissement du béton et après enlèvement des étais. Les actions suivantes doivent être considérées lors du dimensionnement de la dalle mixte (Eurocode 1) :

- poids propre de la dalle (tôle nervurée et béton) $g = g_p + g_c$;
- effet de l'enlèvement de l'étayage éventuel (réactions ponctuelles) ;

- poids du revêtement et des finitions q_{fin} ;
- charge utile q .

Pour le calcul des flèches de la dalle mixte, il faut également tenir compte des effets à long terme du béton tels que le fluage et le retrait.

2. Calcul de la tôle nervurée

Ce calcul correspond à la situation du stade de construction, dans laquelle la tôle reprend seule son poids propre, le poids du béton frais et les charges de construction. Il doit être conforme à l'Eurocode 3. Partie 1.3 (voir [Doc. C 2 567]). Il s'effectue comme celui d'une tôle de toiture, à condition de prendre en compte les particularités d'une tôle adaptée à la construction de plancher telles que les bossages qui peuvent, dans certaines configurations, avoir un effet sur la résistance et la rigidité.

2.1 Analyse pour les sollicitations (détermination des efforts intérieurs)

En principe, l'analyse globale d'une tôle nervurée de plancher est basée sur un comportement élastique linéaire des matériaux. Les efforts intérieurs sont déterminés en considérant une poutre de largeur unitaire (1 m) d'inertie constante. Le schéma statique peut être influencé par l'étayage. En cas de tôle simplement appuyée à ses extrémités ou de tôle continue étayée, l'Eurocode 4 recommande l'analyse élastique. En cas de pose sur plus de deux appuis définitifs sans étai, une analyse rigide plastique basée sur un moment de résistance partielle au droit des appuis intermédiaires est possible. Ce moment de résistance partielle doit être déterminé expérimentalement (voir § 2.2) ou, à défaut, être pris égal à zéro.

Le calcul des flèches sous l'action du béton frais est effectué de façon approchée en considérant l'inertie moyenne des sections efficaces en travée (sous moment positif) et sur appui (sous moment négatif). Si on utilise l'analyse rigide plastique, les variations de rigidité due à la plastification sur appuis doivent être prises en compte dans le calcul des flèches.

2.2 Calcul de la résistance des sections

La détermination des caractéristiques des sections transversales des tôles nervurées de plancher est identique à celle des autres tôles nervurées. Cependant, selon leur forme, les bossages situés sur les âmes ou sur les ailes du profil peuvent modifier ces caractéristiques des sections, tant en ce qui concerne la résistance que la rigidité. Par exemple, des bossages verticaux sur les âmes peuvent augmenter la résistance au cisaillement et à l'écrasement (réaction d'appui), mais réduire la résistance et la rigidité à la flexion, alors que des bossages horizontaux peuvent avoir des effets inverses.

En règle générale, il est tenu compte de ces particularités dans les valeurs données par les fabricants. D'autre part, il est très courant que ces valeurs soient déterminées expérimentalement, les valeurs calculées étant généralement plus basses à cause de tous les paramètres géométriques compliqués à prendre en compte avec des marges suffisantes.

La résistance en section des tôles nervurées est en général calculée sur la base d'une section efficace déterminée selon les indications de l'Eurocode 3, partie 1.3. Le moment résistant M_{Rk} est obtenu lorsque la contrainte maximale de compression, dans la section efficace, atteint la limite d'élasticité f_{yb} . Si l'aile tendue atteint cette limite avant l'aile comprimée, la résistance ultime à la flexion M_{Rk} peut être obtenue en utilisant la réserve plastique de l'aile tendue jusqu'à ce que la contrainte maximale de compression

atteigne également f_{yb} . Il faut relever que la résistance en section sur appui est influencée par l'interaction entre le moment négatif et la force transversale (la réaction d'appui).

2.3 Vérification de la tôle nervurée

2.3.1 États limites ultimes

La procédure de vérification de la tôle nervurée au stade de construction est en général basée sur une analyse globale élastique et sur un calcul élastique de la résistance des sections (avec prise en compte éventuelle de la réserve plastique dans les ailes tendues). Elle est alors la suivante :

1. Sur la base du système porteur du plancher (poutraison), on choisit un profil de tôle et son épaisseur, l'épaisseur de la dalle et le nombre de travées à couvrir par une longueur de plaque de tôle.
2. On détermine en suite si la tôle est étayée ou non lors du bétonnage.
3. Puis on détermine les charges agissant sur la tôle (§ 2.1) ainsi que les combinaisons.
4. Pour chaque combinaison, on calcule les efforts intérieurs sollicitants de flexion M_{Ed} , d'effort tranchant V_{Ed} et de réaction d'appui R_{Ed} .
5. On calcule ensuite les résistances des sections efficaces M_{Rd} , V_{Rd} et R_{Rd} ou on utilise les valeurs données par le fabricant.
6. Enfin, on effectue les vérifications de la flexion, de l'effort tranchant et de la réaction d'appui :

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \quad (2)$$

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \quad (3)$$

$$R_{Ed} \leq R_{Rd} \quad (4)$$

ainsi que l'interaction :

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} + \frac{R_{Ed}}{R_{Rd}} \leq 1,25 \quad (5)$$

2.3.2 États limites de service

Lors du bétonnage, la flèche de la tôle nervurée sous son poids propre et celui du béton frais ne doit pas dépasser une valeur limite, fixée par exemple à $L/180$ par l'Eurocode 4, L étant la portée de la tôle entre appuis. En cas de tôle nervurée étayée, les étais sont considérés ici comme des appuis. Si les conditions particulières le permettent, on pourra tolérer une flèche plus grande à condition de tenir compte du surplus de béton lors de la vérification de la sécurité structurale.

En cas de dalle épaisse, il est également possible de bétonner la dalle en deux couches, de façon à éviter de disposer un étayage coûteux et gênant. Après durcissement de la première couche, la dalle mixte peut déjà résister aux efforts dus au poids du béton de la deuxième couche. Il faut cependant disposer une armature supplémentaire de cisaillement capable de reprendre l'effort rasant entre les deux couches.

3. Calcul de la dalle mixte

3.1 Analyse pour les sollicitations (détermination des efforts intérieurs)

Les méthodes d'analyse suivantes peuvent être utilisées pour les états limites ultimes :

- l'analyse est effectuée selon une méthode élastique linéaire pour une dalle mixte continue de largeur unitaire (1 m) assimilée à une poutre d'inertie constante (figure 7c, ligne ①). On considère alors l'inertie de la section non fissurée. La prise en compte des effets de la fissuration sur appui est possible en réduisant forfaitai-

rement le moment sur appui (réduction maximale de 30 %) et en augmentant les moments en travée correspondant au maintien de l'équilibre (figure 7c ligne ②) ;

– l'analyse est effectuée en négligeant totalement l'armature sur appui et en considérant la dalle comme une succession de travées isostatiques (figure 7c, ligne ③). Une armature minimale doit alors toujours être disposée sur appuis. Cette distribution d'efforts est indépendante de toute variation d'inertie car la dalle est isostatique ;

– l'analyse est effectuée en considérant que la dalle est une poutre continue à inertie variable, selon l'armature mise en place et selon l'état fissuré ou non des sections.

L'analyse consiste à appliquer, au schéma statique correspondant à l'analyse choisie, les charges et actions données au paragraphe 1.5.2.

L'exemple numérique donné dans le paragraphe 4 donne une idée de la façon de déterminer la valeur de calcul des actions, d'analyser les efforts intérieurs (M , V) et de procéder aux vérifications.

3.2 Calcul de la résistance des sections

Les sections critiques qu'il est nécessaire de vérifier lors du dimensionnement des dalles mixtes sont les suivantes (figure 8) :

- section I : la rupture est susceptible d'être conditionnée par l'atteinte du moment résistant plastique positif ;
- section II : la rupture est susceptible d'être conditionnée par l'atteinte du moment résistant plastique négatif ;
- section III : la rupture est susceptible d'être conditionnée par l'atteinte de la résistance à l'effort tranchant ;
- section IV : la rupture est susceptible d'être conditionnée par l'atteinte de la résistance de la connexion (cisaillement longitudinal) ;
- section V : la rupture est susceptible d'être conditionnée par l'atteinte de la résistance au poinçonnement.

3.2.1 Flexion positive

La valeur de calcul du **moment résistant plastique positif** d'une section de dalle mixte $M_{pl,Rd}^+$ peut être déterminée en admettant une répartition plastique des contraintes (figure 9). La position de l'axe neutre plastique est donnée par :

$$x_{pl}^+ = \frac{f_{yp} A_{pe}}{\gamma_{ap} 0,85 f_{ck} b} \gamma_c \quad (6)$$

- avec f_{yp} limite d'élasticité de l'acier de la tôle nervurée,
 A_{pe} aire de la section efficace de la tôle nervurée,
 γ_{ap} facteur de résistance γ_{M1} pour l'acier de la tôle nervurée,
 γ_c facteur de résistance γ_{M1} pour le béton,
 b largeur unitaire (1 000 mm),
 f_{ck} valeur caractéristique de la résistance à la compression du béton sur cylindre à 28 jours.

L'aire efficace A_{pe} de la tôle nervurée est obtenue en négligeant la largeur des bossages, sauf s'il est démontré par des essais qu'une aire supérieure est efficace. Si l'axe neutre est situé au-dessus des nervures ($x_{pl}^+ \leq h_c$) (cf. figure 9a), la valeur de calcul du moment résistant plastique positif de la section mixte vaut alors :

$$M_{pl,Rd}^+ = \frac{f_{yp}}{\gamma_{ap}} A_{pe} \left(d_p - \frac{x_{pl}^+}{2} \right) \quad (7)$$

- avec d_p hauteur utile en flexion positive : $d_p = h - e$,
 e distance de l'axe de gravité du profil à la fibre moyenne de l'aile inférieure.

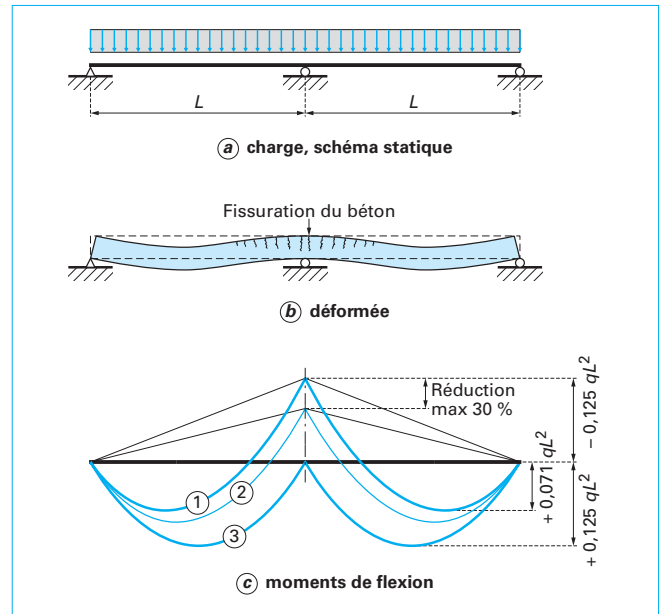


Figure 7 – Analyse d'une dalle mixte continue

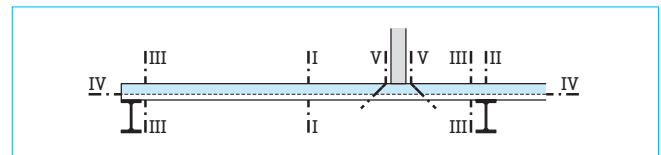


Figure 8 – Sections critiques

Pour les tôles nervurées couramment utilisées ($h_p \leq 60$ mm), avec un recouvrement minimal de 50 mm de béton, l'axe neutre plastique est toujours situé au-dessus des nervures. Pour les tôles nervurées de plus grande hauteur, l'axe neutre plastique peut se trouver dans la hauteur du profil de la tôle. Dans ce cas, la valeur de calcul du moment résistant plastique positif peut être calculée de façon simplifiée comme suit [1] (suivant l'Eurocode 4), en négligeant le béton situé dans les nervures (figure 9b) :

$$M_{pl,Rd}^+ = N_{cf} z^+ + M_{pr} \quad (8)$$

$$\text{avec } N_{cf} = \frac{0,85 f_{ck}}{\gamma_c} h_c b$$

$$\begin{aligned} z^+ &= h - \frac{h_c}{2} - e_p + (e_p - e) \frac{N_{cf} \gamma_{ap}}{f_{yp} A_{pe}} M_{pr} \\ &= 1,25 M_{pa} \left(1 - \frac{N_{cf} \gamma_{ap}}{f_{yp} A_{pe}} \right) \leq M_{pa} \end{aligned}$$

- h_c épaisseur de béton sur les nervures de la tôle,
 h épaisseur totale de la dalle,
 e_p distance de l'axe neutre plastique de la section efficace du profil à la fibre moyenne de l'aile inférieure,
 z^+ bras de levier des résultantes N_{cf} et N_p ,
 M_{pa} résistance ultime à la flexion de la section efficace de la tôle nervurée,

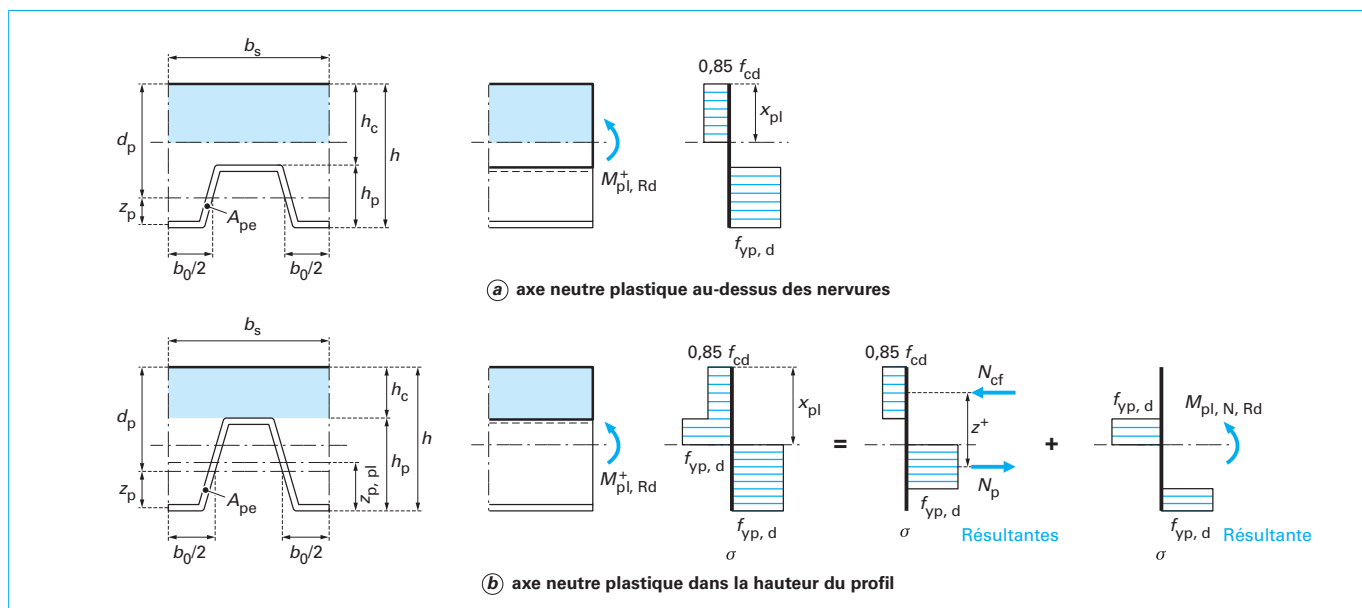


Figure 9 – Section critique I soumise à un moment positif, répartition plastique des contraintes

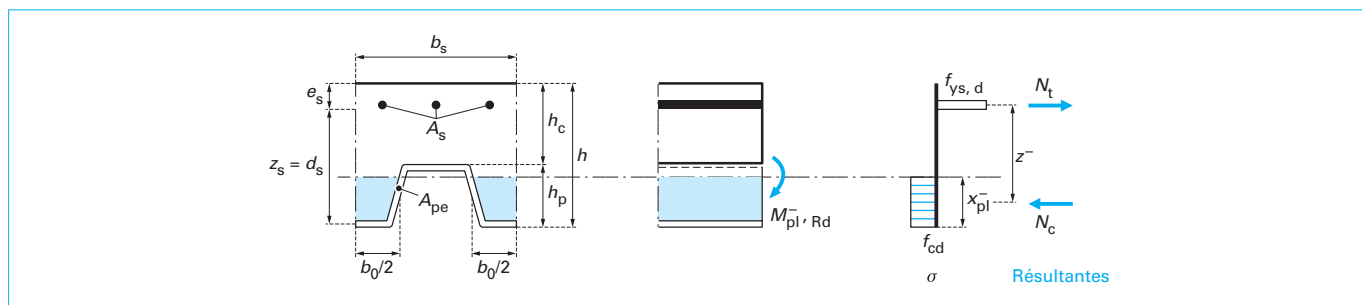


Figure 10 – Section critique II soumise à un moment négatif, répartition plastique des contraintes

N_{cf} valeur de calcul de l'effort normal de compression de la partie de béton située au-dessus des nervures,

M_{pr} valeur de calcul du moment résistant plastique de la tôle nervurée réduite par l'effort normal.

3.2.2 Flexion négative

La section sur appui des dalles mixtes continues peut être assimilée à une section de béton armé. La contribution de la tôle nervurée n'est pas prise en compte, étant donné que l'on n'a pas la certitude que la tôle sera toujours continue sur appuis. La section de calcul ainsi que la répartition plastique des contraintes aux états limites ultimes sont données à la figure 10.

La valeur de calcul du **moment résistant plastique négatif** $M_{pl,Rd}^-$ est donnée par la plastification de l'armature sur appui (dalle sous-armée) :

$$M_{pl,Rd}^- = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} A_s z^- \quad (9)$$

avec A_s aire de la section d'armature,

f_{sk} limite d'élasticité de l'acier d'armature,

z^- bras de levier des efforts intérieurs N_c et N_t ,

γ_s facteur de résistance γ_{M1} pour l'acier d'armature.

La condition d'équilibre entre les efforts intérieurs permet de déterminer z^- :

$$N_c = \frac{0,85 f_{ck}}{\gamma_c} b_c x_{pl}^- = N_t = \frac{f_{ys}}{\gamma_s} A_s \quad (10)$$

d'où :

$$x_{pl}^- = \frac{A_s f_{sk}}{\gamma_s} \frac{\gamma_c}{0,85 f_{ck} b_c} \quad (11)$$

et :

$$z^- = d_s - \frac{x_{pl}^-}{2} \quad (12)$$

avec d_s hauteur utile en flexion négative : $d_s = h - e_s$,

e_s distance de l'axe de gravité de la barre d'armature longitudinale à la fibre supérieure du béton,

b_c largeur du béton en compression, admise comme étant la largeur moyenne des nervures sur 1 m de largeur de dalle, par simplification : $b_c = \Sigma b_0$,

b_0 largeur moyenne d'une nervure remplie de béton.

3.2.3 Cisaillement vertical

On admet en général que la résistance à l'effort tranchant est donnée par la seule section de béton des nervures, la participation de la tôle étant négligée à cause de la grande différence de rigidité.

La valeur de calcul de la **résistance à l'effort tranchant** $V_{v,Rd}$ pour une largeur égale à l'entraxe des nervures de la tôle vaut donc :

$$V_{v,Rd} = k_v (1,2 + 40\rho) \tau_{Rd} b_0 d \quad (13)$$

avec k_v facteur de réduction : $k_v = 1,60 - d$ (d en m),

ρ pourcentage d'acier : $\rho = \frac{A_{pe}}{b_0 d} \leq 0,02$,

τ_{Rd} valeur de calcul de la contrainte limite de cisaillement du béton (selon l'Eurocode 2),

d hauteur utile (section en travée : $d = d_p$; section sur appui : $d = d_s$).

3.2.4 Poinçonnement

La valeur de calcul de la **résistance au poinçonnement** $V_{p,Rd}$ d'une dalle mixte soumise à une charge concentrée est donnée par :

$$V_{p,Rd} = \tau_{cd} C_p h_c \quad (14)$$

avec C_p périmètre critique (figure 11).

3.2.5 Cisaillement longitudinal

La résistance à l'effort rasant d'une dalle mixte est due à la liaison acier-béton réalisée à l'interface entre ces deux matériaux par le frottement (forme rentrante des nervures), par les bossages ou par un ancrage placés à l'extrémité des dalles. La résistance de ces connexions ne peut être déterminée qu'au moyen d'essais.

Actuellement, la méthode la plus utilisée permettant de déterminer la valeur de calcul de la résistance au cisaillement longitudinal d'une dalle mixte est celle qui a été développée aux États-Unis [2] et

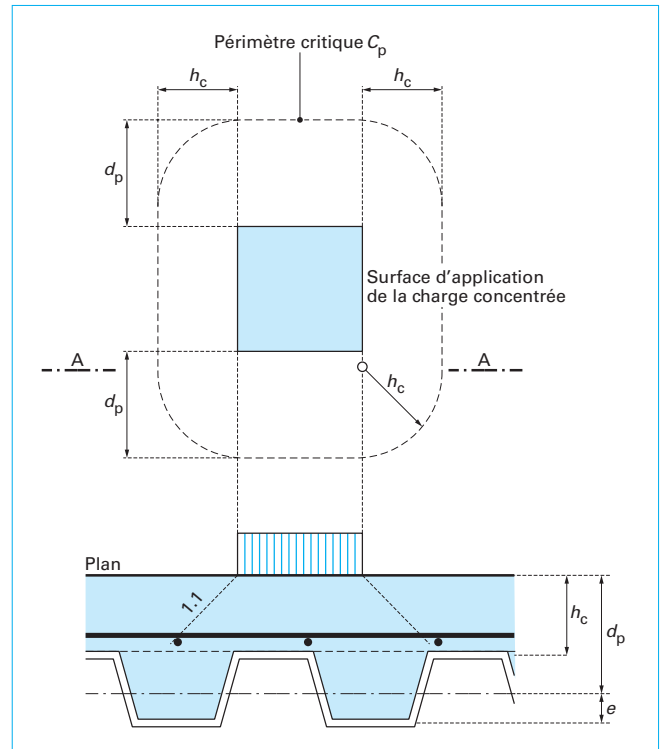


Figure 11 – Périmètre critique pour le poinçonnement

qui figure dans de nombreuses normes, en particulier dans l'Eurocode 4. Cette méthode, semi-empirique, consiste, sur la base d'au moins six essais de dalles en poutre simple, à déterminer deux facteurs (m et k) par type de tôle nervurée (figure 12). Cette méthode incorpore les effets du frottement et des bossages, mais pas l'ancrage d'extrémité.

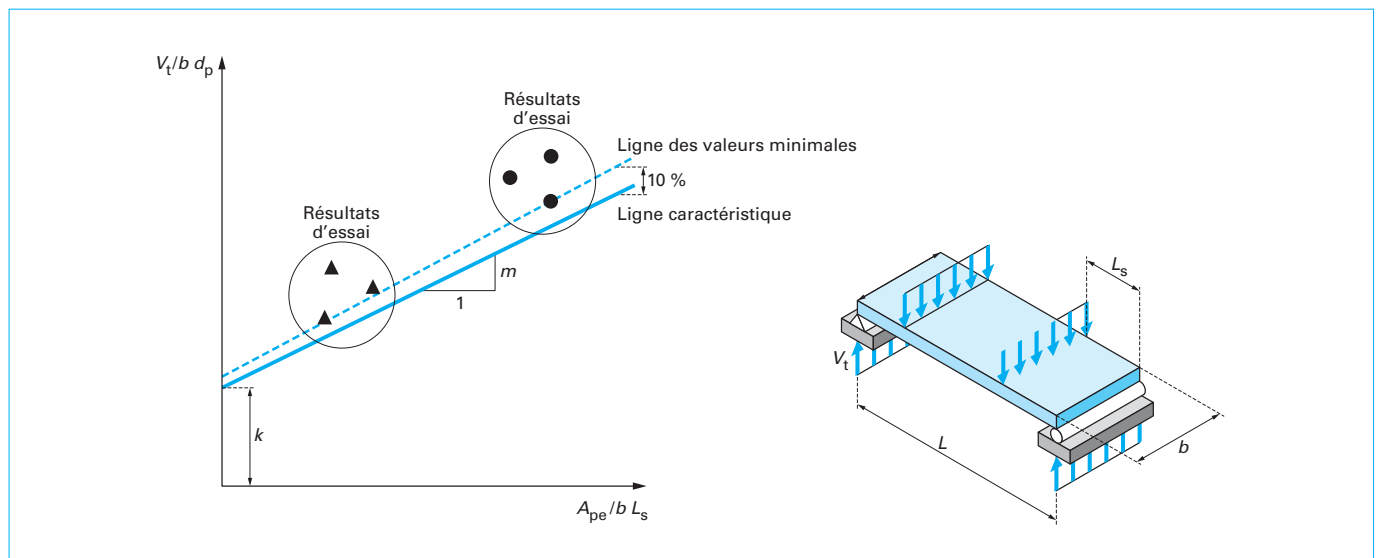


Figure 12 – Méthode semi-empirique pour l'évaluation de la résistance au cisaillement longitudinal d'une dalle mixte à tôle nervurée

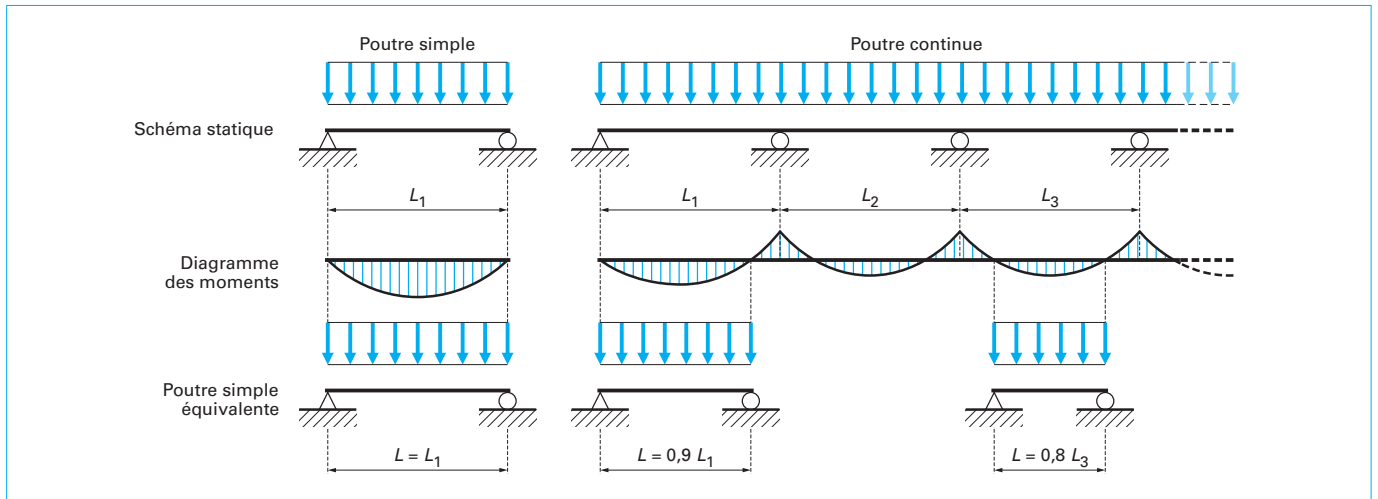


Figure 13 – Définition de la poutre simple équivalente de portée L

La valeur de calcul de la **résistance au cisaillement longitudinal** d'une dalle mixte est alors donnée par l'**effort tranchant limite** $V_{\ell,Rd}$ suivant :

$$V_{\ell,Rd} = \frac{b d_p}{\gamma_{v,s}} \left[m \frac{A_{pe}}{b L_s} + k \right] \quad (15)$$

avec b largeur unitaire ($b = 1\,000$ mm),
 d_p hauteur utile,
 $\gamma_{v,s}$ coefficient de résistance γ_{M2} pour la connexion par frottement (cisaillement longitudinal),
 m et k facteurs semi-empiriques déterminés expérimentalement (figure 12),
 L_s portée de cisaillement (pour une dalle chargée uniformément, $L_s = L/4$),
 L portée de la poutre simple équivalente (figure 13).

3.2.6 Ancrage

Si la connexion mécanique fournie par le frottement (forme « rentrante » des nervures) ou par les bossages est insuffisante, il est possible d'y suppléer en disposant sur les appuis un ancrage d'extrémité (connecteur acier-béton en général). La résistance d'un tel ancrage est donnée par la **résistance à l'arrachement de la tôle nervurée**. Pour un goujon (figure 14), cette résistance est analogue à une résistance à la pression diamétrale ; sa valeur de calcul est donnée par l'expression suivante :

$$P_{pb,Rd} = \frac{f_{yp}}{\gamma_v} k_\phi d_{do} t \quad (16)$$

avec $k_\phi = 1 + a/d_{do} \leq 6,0$, valable pour autant que $a \geq 1,5 d_{do}$,
 d_{do} diamètre du bourrelet de soudage autour du goujon ; on peut admettre en pratique $d_{do} = 1,1 d$ (d : diamètre du goujon),
 a pince dans la direction de l'effort (distance entre l'axe du goujon et l'extrémité de la tôle nervurée, figure 14),
 t épaisseur de la tôle nervurée,
 γ_v facteur de résistance γ_{M2} pour la connexion par goujon.

Il faut s'assurer que la soudure du goujon sur la poutrelle métallique lie également la tôle nervurée sur cette dernière.

La valeur de calcul de l'**effort tranchant limite** $V_{anc,Rd}$ est donnée par l'équilibre des efforts dans le modèle de l'arc à sous-tirant :

$$M_{Rd} = N_t \left(h - \frac{x_f}{3} \right) = V_{anc,Rd} L_s \quad (17)$$

avec N_t valeur de calcul de l'effort de traction transmis par la tôle ancrée : $N_t = N_D P_{pb,Rd}$.

On a alors :

$$V_{anc,Rd} = \frac{1}{L_s} N_D P_{pb,Rd} \left(h - \frac{x_f}{3} \right) \quad (18)$$

avec N_D nombre de goujons par unité de largeur de tôle,
 $P_{pb,Rd}$ valeur de calcul de la résistance en pression diamétrale d'un goujon (arrachement de la tôle nervurée autour du goujon) : équation (16),
 L_s portée de cisaillement (figure 12) ; pour une dalle chargée uniformément, $L_s = L/4$,
 x_f position de l'axe neutre élastique de la section totale fissurée : équation (19).

La position de l'axe neutre élastique de la section totale fissurée est donnée par :

$$x_f = \frac{3n}{b} \left[- (A_s + A_{pe}) + \sqrt{(A_s + A_{pe})^2 + \frac{2b}{3n} (A_s d_s + A_{pe} d_p)} \right] \quad (19)$$

avec n coefficient d'équivalence ($n = E_a/E_c$).

3.2.7 Armature complémentaire

Il est également possible d'augmenter la résistance de la dalle par l'adjonction d'une armature complémentaire dans les nervures (figure 15). Cette armature permet également d'augmenter la résistance au feu de la dalle mixte.

La **résistance complémentaire au cisaillement longitudinal** de la dalle mixte $V_{\ell,s,Rd}$ est calculée à partir de la part d'effort tranchant équilibrée par l'armature, l'autre part étant équilibrée par la tôle. Ces parts étant admises proportionnelles aux moments

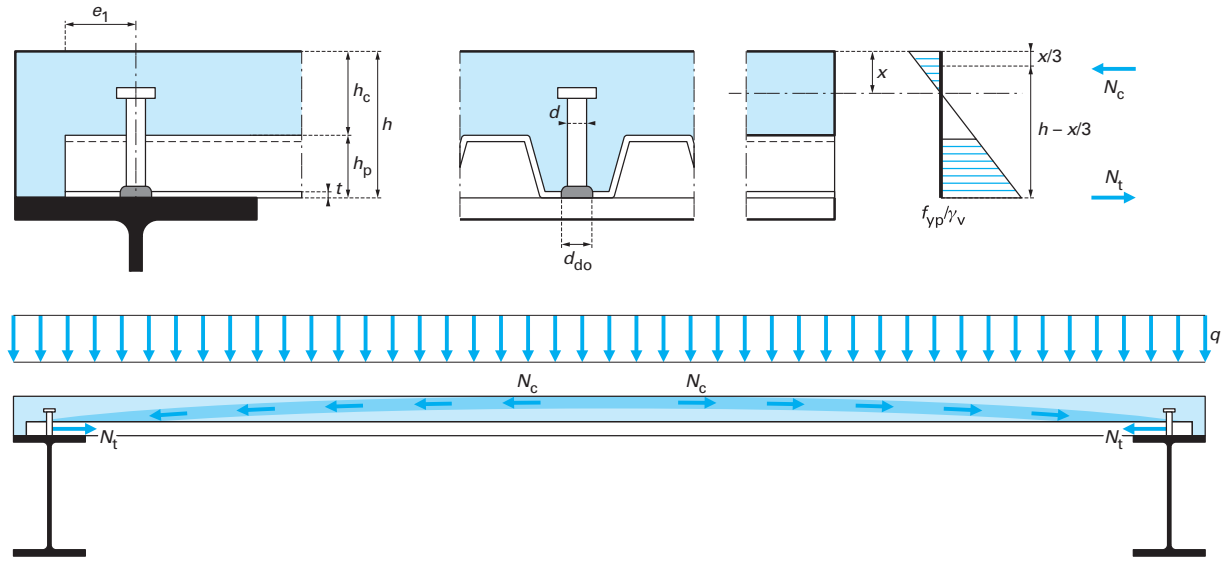


Figure 14 – Ancre de la dalle mixte

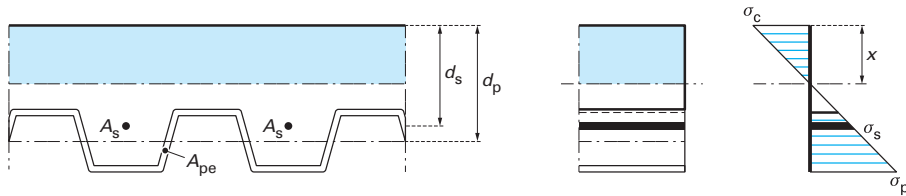


Figure 15 – Section mixte avec armature complémentaire

statiques respectifs par rapport à l'axe neutre de la section mixte totale fissurée, on en tire la valeur de calcul suivante :

$$V_{\ell,s,Rd} = V_{\ell,Rd} \frac{A_s(d_s - x_f)}{A_p(d_p - x_f)} \quad (20)$$

3.2.8 Combinaison bossages, ancrage et armature complémentaire

La valeur de calcul de la résistance au cisaillement longitudinal d'une dalle mixte constituée d'une tôle nervurée avec bossages, ancrage d'extrémité et armature complémentaire est admise égale à la somme des efforts tranchants V_{Rd} respectifs :

$$V_{\ell,tot,Rd} = V_{\ell,Rd} + V_{anc,Rd} + V_{\ell,s,Rd} \quad (21)$$

3.3 Vérification des états limites ultimes

La vérification des états limites ultimes consiste à montrer que, dans les sections critiques, les valeurs de calcul des efforts intérieurs sont plus petites que les valeurs de calcul des résistances des sections.

3.3.1 Flexion positive

Cette vérification s'effectue dans la section de moment positif maximal (section I, figure 8), située en général dans la travée de rive d'une dalle continue. La condition s'exprime ainsi :

$$M_{Ed}^+ \leq M_{pl,Rd}^+ \quad (22)$$

avec M_{Ed}^+ valeur de calcul du moment positif agissant,

$M_{pl,Rd}^+$ valeur de calcul du moment résistant plastique positif de la section mixte : équation (7) ou (8).

3.3.2 Flexion négative

Cette vérification sur appui (section II, figure 8), se fait avec le moment négatif considéré dans l'analyse statique. La condition s'exprime ainsi :

$$M_{Ed}^- \leq M_{pl,Rd}^- \quad (23)$$

avec M_{Ed}^- valeur de calcul du moment négatif agissant,

$M_{pl,Rd}^-$ valeur de calcul du moment résistant plastique négatif de la section mixte : équation (9).

3.3.3 Cisaillement vertical

Cette vérification dans les sections d'appui (section III, figure 8) est rarement déterminante. Elle peut l'être dans le cas d'une dalle compacte (courte par rapport à son épaisseur) très sollicitée. Elle intervient dans la section d'appui d'extrémité, où le moment de flexion est nul, ainsi que sur un appui intermédiaire où l'on admet qu'il n'y a pas d'interaction entre le moment résistant et la résistance à l'effort tranchant. La condition s'exprime ainsi :

$$V_{Ed} \leq V_{v,Rd} \quad (24)$$

avec V_{Ed} valeur de calcul de l'effort tranchant agissant,
 $V_{v,Rd}$ valeur de calcul de la résistance à l'effort tranchant de la section mixte : équation (13).

3.3.4 Poinçonnement (section V)

Si une charge concentrée Q est appliquée sur une dalle mixte, la condition de vérification s'exprime ainsi :

$$Q_{Ed} \leq V_{p,Rd} \quad (25)$$

avec Q_{Ed} valeur de calcul de la charge concentrée agissante,
 $V_{p,Rd}$ valeur de calcul de la résistance au poinçonnement de la dalle mixte : équation (14).

3.3.5 Cisaillement longitudinal (section IV)

Cette vérification est souvent déterminante pour les dalles mixtes avec tôle nervurée non ancrée. Cela signifie que la rupture de la dalle a lieu par épuisement de la résistance de la liaison. Le moment résistant plastique dans la section I ne peut être atteint. La vérification s'exprime ainsi :

$$V_{Ed} \leq V_{\ell,Rd} \quad (26)$$

avec V_{Ed} valeur de calcul de l'effort tranchant agissant,
 $V_{\ell,Rd}$ valeur de calcul de la résistance au cisaillement longitudinal (effort tranchant limite : équation (15) ou (21)).

3.4 Méthode de la connexion partielle (méthode alternative)

La ruine à l'état limite de rupture d'adhérence peut aussi être vérifiée par la méthode de la connexion partielle, valable pour les dalles simplement appuyées à leurs extrémités (méthode τ) [3].

Elle est basée sur la connaissance de la contrainte de cisaillement ultime $\tau_{u,Rd}$ et du diagramme d'interaction partielle limite de la dalle liant le moment résistant partiel M_{Rd} au moment agissant dans la dalle M_{Ed} , fonction de la portée de la dalle. Cette méthode n'est applicable que pour les dalles se comportant de manière ductile. La valeur de $\tau_{u,Rd}$, fournie par le producteur de tôle nervurée et déterminée par des essais standardisés, permet de déterminer le diagramme de calcul en connexion partielle (figure 16).

Dans ce diagramme, la valeur de calcul du moment résistant partiel M_{Rd} d'une section transversale située à une distance L_x de l'appui le plus proche est tracée en fonction de L_x . La longueur L_{sf} minimale nécessaire pour obtenir une connexion totale est donnée par la formule suivante :

$$L_{sf} = \frac{N_{cf}}{b\tau_{u,Rd}} \quad (27)$$

avec N_{cf} effort dans le béton [équation (8)] en considérant une connexion totale.

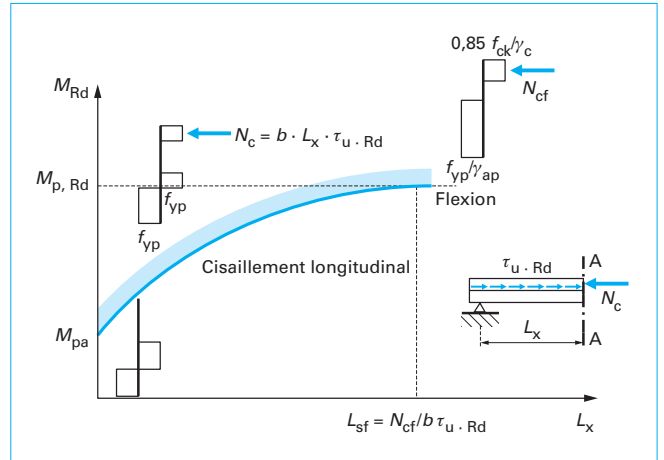


Figure 16 – Diagramme de calcul en interaction partielle

Pour $L_x \geq L_{sf}$, la connexion est totale, donc la grandeur déterminante est le moment résistant.

Pour $L_x < L_{sf}$, la connexion est partielle, donc la grandeur déterminante est la résistance au cisaillement longitudinal. Le moment résistant partiel correspondant (au milieu d'une travée simplement appuyée, $L_x = L/2$) est donné par la relation suivante :

$$M_{Rd} = M_{pa} + \frac{L}{2L_{sf}}(M_{p,Rd} - M_{pa}) \quad (28)$$

La méthode de vérification est illustrée par la figure 17 pour deux dalles avec différents types de chargement et de portée. Le diagramme du moment résistant et le diagramme du moment agissant, fonction de la portée de la dalle, sont tracés sur le même graphique. À l'endroit d'une section transversale quelconque, la valeur de calcul du moment agissant M_{Ed} ne doit pas être supérieure à la valeur de calcul du moment résistant M_{Rd} .

3.5 Vérification des états limites de service

3.5.1 Calcul des flèches

Pour le calcul des flèches des dalles mixtes, on fait en général les hypothèses suivantes :

– la dalle est assimilée à une poutre continue d'inertie constante égale à la moyenne des inerties positives des sections fissurées et non fissurées ;

$$I_{bm} = \frac{I_{bf} + I_{bh}}{2}$$

– il faut tenir compte des effets à long terme du chargement du béton en admettant un coefficient d'équivalence $n = E_a/E_c$ différent selon la durée d'application des charges ; par exemple $n = 6$ pour les charges utiles de courte durée et $n = 18$ pour les charges permanentes ; il est également possible de considérer un coefficient d'équivalence moyen égal à 12 en cas de béton de densité normale, valable pour toutes les charges.

3.5.2 Caractéristiques des sections

Le calcul des flèches des dalles mixtes s'effectue à l'aide des caractéristiques élastiques des sections (figure 18).

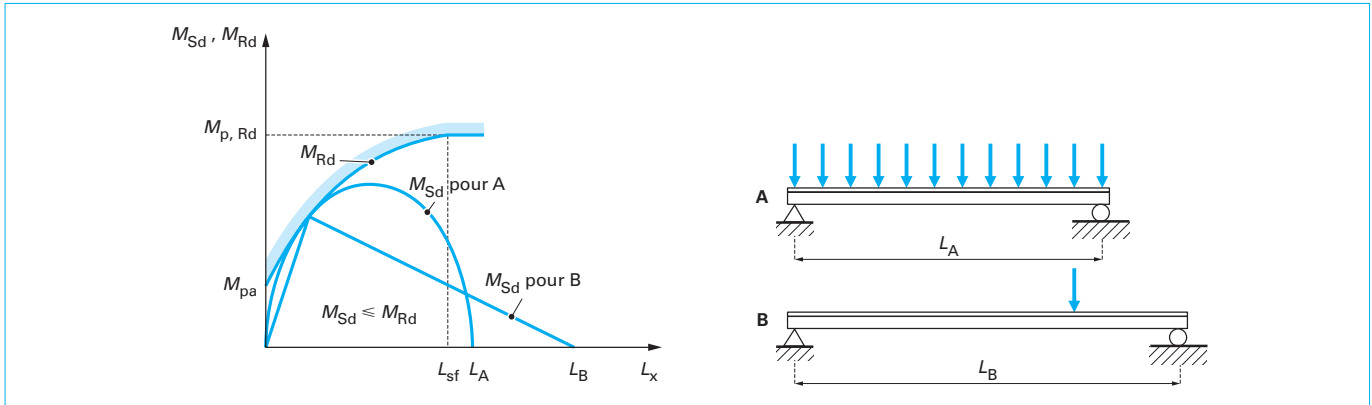


Figure 17 – Méthode de vérification

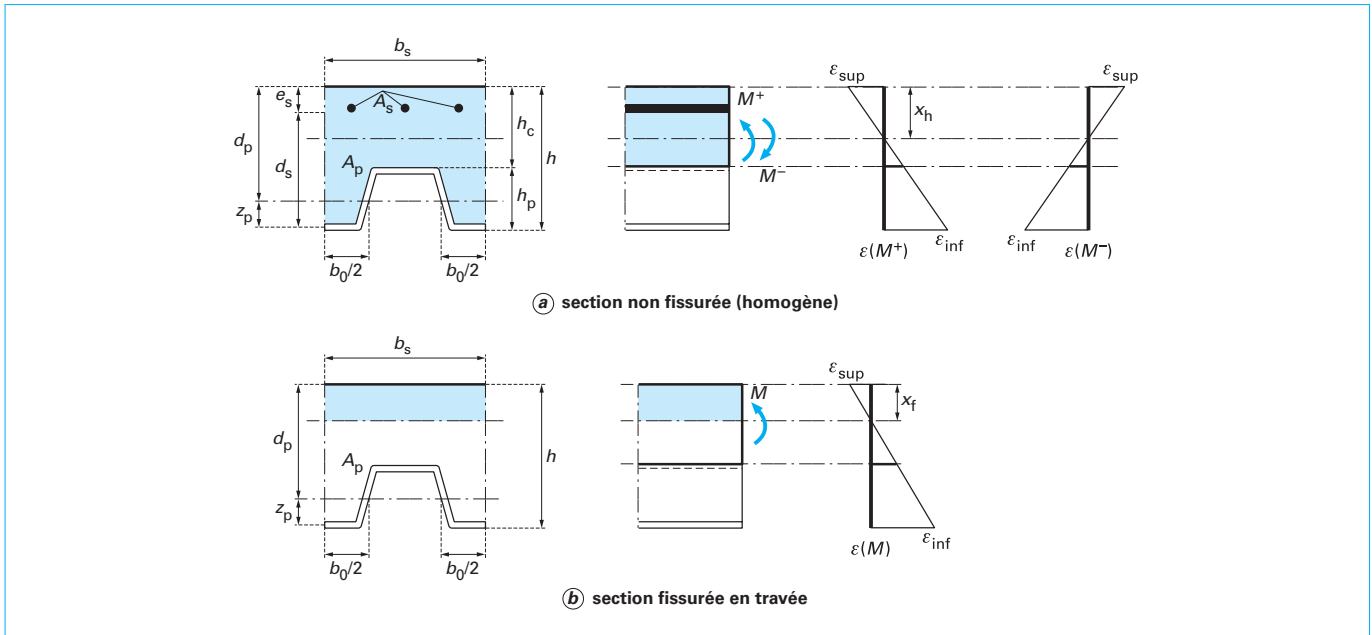


Figure 18 – Sections mixtes fissurées et non fissurées

■ Le moment d'inertie I_{bh} d'une **section mixte non fissurée** (ou homogène, toute la section de béton est prise en considération) est donné par la relation :

$$I_{bh} = \frac{bh_c^3}{12n} + \frac{bh_c}{n} \left(x_h - \frac{h_c}{2} \right)^2 + \frac{b_c h_p^3}{12n} + \frac{b_c h_p}{n} \left(h - x_h - \frac{h_p}{2} \right)^2 + A_p (d_p - x_h)^2 + A_s (x_h - d_s)^2 + I_p \quad (29)$$

avec x_h position de l'axe neutre élastique en section homogène :

$$x_h = \frac{b \frac{h_c^2}{2} + b_c h_p d_p + n (A_p d_p + A_s e_s)}{bh_c + b_c h_p + n (A_p + A_s)} \quad (30)$$

b_c largeur totale des nervures pour une largeur de dalle d'un mètre : $b_c = \Sigma b_0$.

Les autres variables sont données sur la figure 18.

■ Le moment d'inertie I_{bf} d'une **section mixte fissurée** (le béton tendu est négligé) en flexion positive (travée) est donné par la relation suivante :

$$I_{bf} = \frac{bx_f^3}{3n} + A_p (d_p - x_f)^2 + I_p \quad (31)$$

avec x_f position de l'axe neutre élastique en section fissurée :

$$x_f = \frac{nA_p}{b} \left(\sqrt{1 + \frac{2bd_p}{nA_p}} - 1 \right) \quad (32)$$

A_p aire de la section nette d'acier de la tôle nervurée (non réduite),

d_p position de l'axe de gravité de la tôle nervurée par rapport à la fibre supérieure de la dalle,

b largeur unitaire (1 000 mm),

- n coefficient d'équivalence : $n = E_a/E_c$,
 I_p moment d'inertie de l'aire de la section nette d'acier de la tôle nervurée (non réduite).

3.5.3 Cas de charges et valeurs limites des flèches

■ Au **stade de construction**, la flèche sous l'effet du cas de charge quasi permanent (poids propre de la tôle et du béton frais) doit être limitée pour des exigences d'aspect et pour réduire le poids du surplus de béton dû à l'effet de mare :

$$w_1 = w(g_p + g_c) \leq w_{\text{lim}} = \frac{L}{180} \quad (33)$$

Il est nécessaire de tenir compte du poids du surplus de béton g_c^+ si :

$$w_1 = w(g_p + g_c) > \frac{h}{10} \quad (34)$$

■ Au **stade définitif**, les flèches sous l'effet des cas de charge rare, fréquent et quasi permanent, doivent être limitées afin que les éléments en liaison avec la dalle (faux-plafonds, canalisations techniques, chapes, cloisons) ne soient pas endommagés (exigences de l'état limite de service « aptitude au fonctionnement »). Si la tôle n'est pas étayée, il n'est donc pas nécessaire d'inclure la flèche de la tôle au stade de construction dans la vérification de la flèche totale de la dalle mixte. Il faut également considérer les exigences des états limites de service « confort » et « aspect ». Les critères de dimensionnement, les cas de charge et les valeurs limites de la flèche verticale sont alors les suivants (L est la portée de la dalle) :

- État limite de service « **Aptitude au fonctionnement** » :
 – tôle **étayée** au bétonnage :

$$w(g_b, g_{\text{fin}}, \psi q_k) \leq w_{\text{lim}} \quad (35)$$

- tôle **non étayée** au bétonnage :

$$w(g_{\text{fin}}, \psi q_k) \leq w_{\text{lim}} \quad (36)$$

Flèche limite indicative δ_{lim} :

- revêtement de sol, cloisons fragiles (cas de charge rare, $\psi = \psi_0$) :

$$w_{\text{lim}} = \frac{L}{500} \quad (37)$$

- revêtement de sol, cloisons ductiles (cas de charge fréquent, $\psi = \psi_1$) :

$$w_{\text{lim}} = \frac{L}{350} \quad (38)$$

- État limite de service « **Confort** », cas de charge fréquent :

$$w(\psi_1 q_k) \leq \frac{L}{350} \quad (39)$$

- État-limite de service « **Aspect** », cas de charge quasi permanent :

- tôle **étayée** au bétonnage :

$$w(g_b, g_{\text{fin}}, \psi_2 q_k) \leq \frac{L}{300} \quad (40)$$

- tôle **non étayée** au bétonnage :

$$w(g_{\text{fin}}, \psi_2 q_k) \leq \frac{L}{300} \quad (41)$$

Si l'éclatement de la dalle L/d_p (portée/hauteur utile) ne dépasse une certaine valeur, par exemple celle donnée dans l'Eurocode 2, la vérification des flèches n'est pas nécessaire. Pour les dalles continues portant dans une seule direction, faiblement sollicitées, cette valeur limite est la suivante :

$$\frac{L}{d_p} \leq 26 \quad (42)$$

3.5.4 Vérification de l'ouverture des fissures du béton

Étant donné la présence de la tôle nervurée à la face inférieure de la dalle, seule l'ouverture des fissures du béton sur appui doit être vérifiée. Cette vérification s'effectue selon les règles propres aux constructions en béton armé, par exemple celles énoncées dans l'Eurocode 2.

En cas d'exigences normales (fissures tolérées, pas d'exigence particulière en matière d'étanchéité et d'aspect), une armature minimale disposée sur appui est suffisante. Elle est nécessaire lorsque la dalle mixte est dimensionnée comme une série de poutres simples.

Cette armature minimale est la suivante (h_c voir figure 10) :

- pour les dalles **étayées** lors du bétonnage :

$$\rho = \frac{A_s}{b h_c} \geq 0,4 \% \quad (43)$$

- pour les dalles **non étayées** lors du bétonnage :

$$\rho \geq 0,2 \% \quad (44)$$

3.6 Vérification du comportement vibratoire

La tendance d'un plancher mixte à vibrer de manière perceptible dépend de sa masse, de ses caractéristiques dynamiques et de la nature du phénomène qui provoque cette mise en vibration. Ce dernier peut être dû au mouvement des occupants, à des machines, au vent ou à d'autres effets extérieurs transmis par la structure porteuse du bâtiment (par exemple, le trafic routier ou ferroviaire ou une construction voisine).

La faible masse d'un plancher mixte, qui est l'un de ses avantages structuraux, peut conduire, sous des sollicitations similaires, à une réponse plus « vivante » qu'un plancher-dalle en béton armé, sous des sollicitations similaires. La dalle mixte elle-même, qui porte dans une seule direction, accentue encore cette sensibilité par rapport à une dalle portant dans deux directions.

Les méthodes de calcul permettant de déterminer si un plancher est acceptable du point de vue de son comportement vibratoire sont en général basées sur des approches empiriques simplifiées, étant donné la complexité de la modélisation des charges et de la réponse structurale du système. Ces méthodes sont toutes basées sur un comportement unidirectionnel et prennent en compte la structure entière du plancher, y compris la poutraison.

La vérification du comportement vibratoire d'une dalle mixte (sans poutraison) reposant sur des supports rigides (murs en maçonnerie par exemple) peut être effectuée en assimilant la dalle à une série de poutres mixtes juxtaposées. La **fréquence fondamentale de la dalle** vaut alors :

$$f_0 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1000 E_a I_{bh}}{\bar{m} L^4}} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (45)$$

avec I_{bh} moment d'inertie de la section mixte non fissurée (m^4),
 E_a module d'élasticité de l'acier ($E_a = 210 \times 10^9 \text{ N/m}^2$),

- \bar{m} masse linéique de la dalle en vibration, comprenant son poids propre, la charge permanente et une part à estimer de la charge utile (kg/m),
- L portée de la dalle (portée équivalente en poutre simple) (m).

À partir de cette fréquence propre, il est possible de déterminer par exemple :

- l'accélération maximale de la dalle due à une action dynamique répétée : machine tournante, personnes effectuant des sauts à rythme cadencé, etc. (vibrations continues) ;
- l'accélération de la dalle due à une action unique : personne marchant sur la dalle, coup de talon, choc, etc. (vibrations transitoires).

En cas de vibrations continues, il faut éviter les phénomènes de résonance. La fréquence propre de la dalle doit être supérieure à une valeur limite (par exemple, les valeurs indicatives données dans l'Eurocode 1).

En cas de vibrations transitoires, il faut évaluer le confort à l'aide de diagrammes donnant le pourcentage d'amortissement requis pour que le seuil de tolérance ne soit pas dépassé.

4. Exemple numérique

Donnée

Soit un bâtiment à plusieurs étages. Les planchers sont constitués de dalles mixtes sur poutres solives. Il s'agit de **vérifier les états limites ultimes et de service** de cette dalle mixte. Le calcul de la tôle nervurée au stade de construction n'est pas considéré dans cet exemple.

4.1 Schéma statique

La dalle mixte repose sur cinq poutres écartées de 2,5 m. La longueur d'une tôle est de 10 m, représentant quatre travées de 2,5 m. La tôle n'est pas étayée au stade de construction. Le schéma statique de la dalle mixte est illustré sur la figure 19.

Les choix suivants sont effectués (avec les caractéristiques des produits correspondants), sur la base d'un prédimensionnement et de l'analyse au stade de construction, non reproduits dans cet exemple :

Tôle nervurée

Cofrastra 40/0,75 mm, acier SE 320 G

Épaisseur totale de la dalle : $h = 100$ mm

Caractéristique de la tôle :

$$f_{yp} = 320 \text{ N/mm}^2 ; z_p = 15,3 \text{ mm}$$

$$m = 149 \text{ N/mm}^2 ; k = 0,131 \text{ N/mm}^2$$

$$A_p = 1\,200 \text{ mm}^2/\text{m} ; I_{eff} = 0,259 \cdot 10^6 \text{ mm}^4/\text{m}$$

Béton

C 25/30

$$f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2 ; f_{ctk,0,05} = 1,8 \text{ N/mm}^2 ; E_{cm} = 31 \text{ kN/mm}^2$$

$$f_{cd} = \frac{0,85 f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0,85 \times 25 \text{ N/mm}^2}{1,5} = 14,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{Rd} = \frac{0,25 f_{ctk}}{\gamma_c} = \frac{0,25 \times 1,8 \text{ N/mm}^2}{1,5} = 0,33 \text{ N/mm}^2$$

Armature

Treillis soudé ($\varnothing 5$ mm/100 mm), $A_s = 196 \text{ mm}^2/\text{m}$

Acier B500B ($f_{sk} = 500 \text{ N/mm}^2$)

4.2 Analyse

4.2.1 Actions à considérer

Poids du surplus de béton lors du bétonnage de la dalle (stade de construction)

Il est nécessaire de tenir compte du poids du surplus de béton dû à la flèche de la tôle nervurée lors du bétonnage si :

$$w_g \geq \frac{h}{10} = \frac{100 \text{ mm}}{10} = 10,0 \text{ mm} \quad (46)$$

Le système statique déterminant pour le calcul de la flèche de la tôle nervurée sous l'effet du poids propre (tôle + béton frais) est donné à la figure 20.

Flèche due au poids propre :

$$\begin{aligned} w_g &= 30,1 \frac{L^4}{I_{eff}} (g_p + g_c) \\ &= 30,1 \frac{(2,5 \text{ m})^4 \times (0,099 + 2,25) \times 10^3 \text{ N/m}}{0,207 \times 10^6 \text{ mm}^4} = 13,3 \text{ mm} \end{aligned} \quad (47)$$

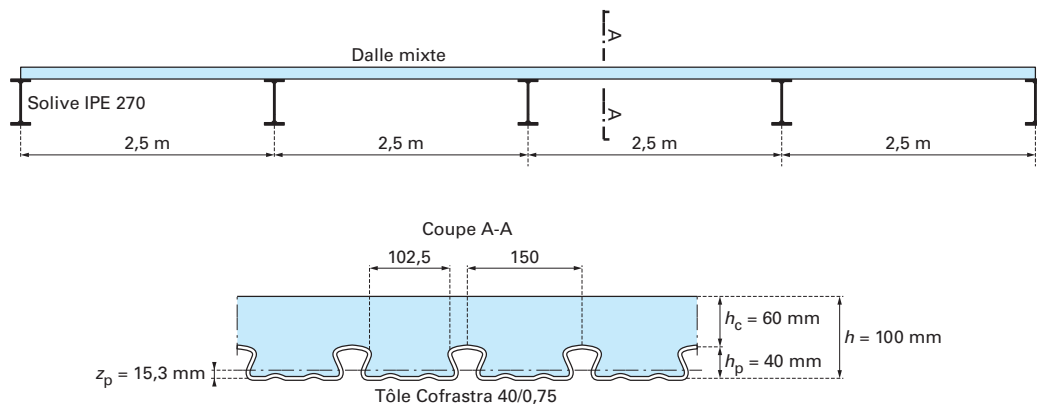


Figure 19 – Dalle mixte à vérifier

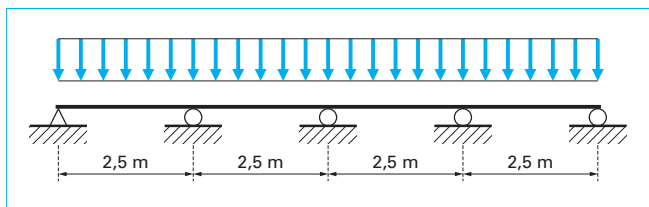


Figure 20 – Schéma statique pour le calcul de la flèche due au poids propre

La flèche est supérieure à 10 mm, il faut donc considérer le **surplus de béton**. Son poids vaut alors :

$$g_c^+ = 0,7 w_g \rho_c = 0,7 \times 0,013 \, 3 \, \text{m} \times 1,0 \, \text{m} \times 25 \, \text{kN/m}^3 = 0,23 \, \text{kN/m} \quad (48)$$

Stade définitif, par mètre de largeur de dalle

Poids propre de la tôle : $g_p = 0,099 \, \text{kN/m}$

Poids propre du béton : $g_c = 2,25 \, \text{kN/m}$

Surplus de béton* : $g_c^+ = 0,23 \, \text{kN/m}$

Poids propre des finitions : $g_{fin} = 1,6 \, \text{kN/m}$

Charge d'exploitation : $q_k = 2,0 \, \text{kN/m}$

4.2.2 Combinaisons d'actions

Stade définitif

La dalle mixte est soumise à la combinaison suivante :

$$E_d = E \{ \gamma_G (g_p + g_c + g_{fin}) + \gamma_Q q_k \} \quad (49)$$

avec γ_G facteur de charge pour les actions permanentes,
 γ_Q facteur de charge pour l'action prépondérante.

4.3 Calcul des efforts intérieurs

Méthode : on néglige l'armature sur appui et on considère la dalle comme une série de poutres simples (figure 21). Tous les calculs sont faits **pour une dalle de 1 m de largeur**.

Moment de flexion sollicitant

$$\begin{aligned} M_{Ed}^+ &= \frac{1,35(g_p + g_c + g_c^+ + g_{fin})L^2}{8} + \frac{1,50 q_k L^2}{8} \\ &= \frac{1,35(0,099 \, \text{kN/m} + 2,25 \, \text{kN/m} + 0,23 \, \text{kN/m} + 1,60 \, \text{kN/m})(2,5 \, \text{m})^2}{8} \\ &\quad + \frac{1,50 \times 2,0 \, \text{kN/m}(2,5 \, \text{m})^2}{8} \\ &= 6,75 \, \text{kN} \cdot \text{m/m} \end{aligned} \quad (50)$$

Effort tranchant sollicitant

$$\begin{aligned} V_{Ed} &= \frac{1,35(g_p + g_c + g_c^+ + g_{fin})L}{2} + \frac{1,50 q_k L}{2} \\ &= \frac{1,35(0,099 \, \text{kN/m} + 2,25 \, \text{kN/m} + 0,23 \, \text{kN/m} + 1,60 \, \text{kN/m})2,5 \, \text{m}}{2} \\ &\quad + \frac{1,50 \times 2,0 \, \text{kN/m} \times 2,5 \, \text{m}}{2} \\ &= 10,8 \, \text{kN/m} \end{aligned} \quad (51)$$

4.4 Résistances en section

4.4.1 Résistance à la flexion de la dalle mixte

Tous les calculs sont effectués **pour un mètre de largeur de dalle**.

Position de l'axe neutre :

$$\begin{aligned} x_{pl} &= \frac{f_{yp} A_{pe}}{\gamma_{ap} 0,85 f_{ck} b} \frac{\gamma_c}{\gamma_c} \\ &= \frac{320 \, \text{N/mm}^2 \times 1 \, 200 \, \text{mm}^2}{1,05} \times \frac{1,5}{0,85 \times 25 \, \text{N/mm}^2 \times 1 \, 000 \, \text{mm}} \\ &= 25,8 \, \text{mm} \end{aligned} \quad (52)$$

Moment résistant plastique positif :

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd}^+ &= \frac{f_{yp}}{\gamma_{ap}} A_{pe} \left(d_p - \frac{x_{pl}^+}{2} \right) = \frac{f_{yp}}{\gamma_{ap}} A_{pe} \left(h - z_p - \frac{x_{pl}^+}{2} \right) \\ &= \frac{320 \, \text{N/mm}^2}{1,05} 1 \, 200 \, \text{mm}^2 \left(100 \, \text{mm} - 15,3 \, \text{mm} - \frac{25,8 \, \text{mm}}{2} \right) \\ &= 26,3 \times 10^6 \, \text{N} \cdot \text{mm} = 26,3 \, \text{kN} \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (53)$$

4.4.2 Cisaillement vertical

Paramètres :

Pour une nervure :

$$b_0 = 102,5 \, \text{mm}$$

$$d_s = h - e_s = 100 \, \text{mm} - 20,3 \, \text{mm} = 79,7 \, \text{mm}$$

$$\tau_{Rd} = 0,33 \, \text{N/mm}^2$$

$$k_v = (1,60 - d_s) = 1,52$$

$$\rho = \frac{A_{pe}}{b_0 d_s} = \frac{1 \, 200 \, \text{mm}^2 \times 150 / 1 \, 000}{102,5 \, \text{mm} \times 79,7 \, \text{mm}} = 0,022 > 0,02 \rightarrow \rho = 0,02$$

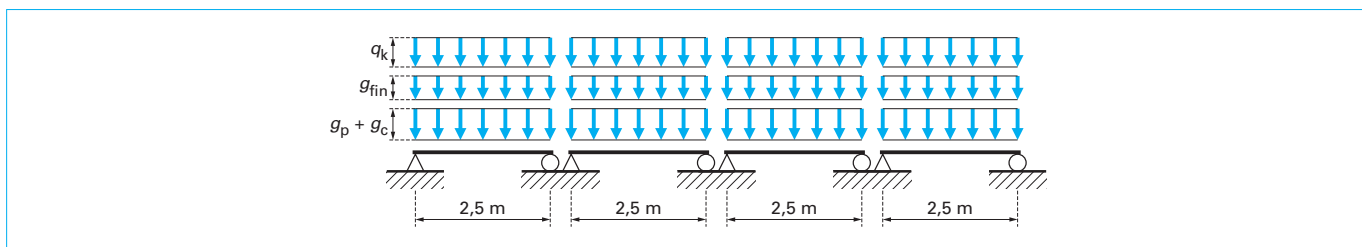


Figure 21 – Système statique de la dalle mixte au stade définitif

Résistance au cisaillement vertical par nervure :

$$\begin{aligned} V_{v,Rd} &= k_v(1,2 + 40\rho)\tau_{Rd}b_0d_s \\ &= 1,52(1,2 + 0,8) \times 0,33 \text{ N/mm}^2 \times 102,5 \text{ mm} \times 79,7 \text{ mm} \times 10^{-3} \quad (54) \\ &= 8,2 \text{ kN} \end{aligned}$$

Nombre de nervures par mètre :

$$n = b/b_s = 1000/150 = 6,67$$

Résistance au cisaillement vertical par mètre de largeur :

$$\Sigma V_{v,Rd} = nV_{v,Rd} = 6,67 \times 8,2 = 54,6 \text{ kN} \quad (55)$$

4.4.3 Cisaillement longitudinal

Avec la portée cisaillée :

$$L_s = L/4 = 2500 \text{ mm}/4 = 625 \text{ mm}$$

on trouve la résistance au cisaillement longitudinal par mètre de largeur :

$$\begin{aligned} V_{\ell,Rd} &= bd_p \left(m \frac{A_{pe}}{bL_s} + k \right) \frac{1}{\gamma_v} \\ &= 1000 \times 84,7 \left(149 \times \frac{1200}{1000 \cdot 625} + 0,131 \right) \frac{1}{1,25} \quad (56) \\ &= 28261 \text{ N} = 28,3 \text{ kN} \end{aligned}$$

4.4.4 Vérifications

Les vérifications par mètre de largeur sont :

$$\begin{aligned} M_{Ed}^+ &= 6,75 \text{ kN} \cdot \text{m} \leq M_{pl,Rd}^+ = 26,2 \text{ kN} \cdot \text{m} \\ V_{Ed} &= 10,8 \text{ kN} \leq V_{v,Rd} = 54,6 \text{ kN} \\ V_{Ed} &= 10,8 \text{ kN} \leq V_{\ell,Rd} = 28,3 \text{ kN} \end{aligned} \quad (57)$$

Les vérifications sont satisfaites.

4.5 État limite de service, vérification des flèches

La dalle est assimilée à une poutre continue sur quatre travées (figure 20) d'inertie constante égale à la moyenne des inerties positives des sections fissurées et non fissurées :

$$I_{bm} = \frac{(I_{bf} + I_{bh})}{2} \quad (58)$$

Pour tenir compte des effets à long terme du béton, on admet le coefficient d'équivalence suivant qui est valable pour toutes les charges :

$$n = \frac{E_p}{E_c} = 15 \quad (59)$$

La vérification des flèches est nécessaire lorsque l'élancement de la dalle L/d_p dépasse 26. Dans notre cas :

$$L/d_p = 2500/84,7 = 29,5 > 26 \quad (60)$$

La vérification doit donc être effectuée.

4.5.1 Calcul des inerties

Inertie de la dalle mixte, section non fissurée

Avec la largeur totale des nervures b_c pour une largeur unitaire de dalle (1 m) :

$$b_c = \frac{1000 \text{ mm}}{150 \text{ mm}} \times 102,5 \text{ mm} = 683 \text{ mm} \quad (61)$$

et avec la position de l'axe neutre :

$$\begin{aligned} x_h &= \frac{\frac{bh_c^3}{12} + b_c h_p d_p + n A_p d_p}{bh_c + b_c h_p + n A_p} \\ &= \frac{\frac{1000 \times 60^3}{12} + 683 \times 40 \times 84,7 + 15 \times 1200 \times 84,7}{1000 \times 60 + 683 \times 40 + 15 \times 1200} = 53,5 \text{ mm} \end{aligned} \quad (62)$$

on trouve l'inertie de la section non fissurée :

$$\begin{aligned} I_{bh} &= \frac{bh_c^3}{12n} + \frac{bh_c}{n} \left(x_h - \frac{h_c}{2} \right)^2 + \frac{b_c h_p^3}{12n} + \frac{b_c h_p}{n} \left(h - x_h - \frac{h_p}{2} \right)^2 \\ &\quad + A_p (d_p - x_h)^2 + I_p \\ &= \frac{1000 \times 60^3}{12 \times 15} + \frac{1000 \times 60}{15} \left(53,5 - \frac{60}{2} \right)^2 \\ &\quad + \frac{683 \times 40^3}{12 \times 15} + \frac{683 \times 40}{15} \left(100 - 53,5 - \frac{40}{2} \right)^2 \\ &\quad + 1200 (84,7 - 53,5)^2 + 0,259 \times 10^6 = 6,36 \times 10^6 \text{ mm}^4 \end{aligned} \quad (63)$$

Inertie de la dalle mixte, section fissurée

Avec la position de l'axe neutre suivante :

$$\begin{aligned} x_f &= \frac{n A_p}{b} \left[\sqrt{1 + \frac{2 b d_p}{n A_p}} - 1 \right] \\ &= \frac{15 \times 1200}{1000} \left[\sqrt{1 + \frac{2 \times 1000 \times 84,7}{15 \times 1200}} - 1 \right] = 40,1 \text{ mm} \end{aligned} \quad (64)$$

on trouve l'inertie de la section fissurée :

$$\begin{aligned} I_{bf} &= \frac{b x_f^3}{3n} + A_p (d_p - x_f)^2 + I_p \\ &= \frac{1000 \times 40,1^3}{3 \times 15} + 1200 (84,7 - 40,1)^2 + 0,259 \times 10^6 = 4,08 \times 10^6 \text{ mm}^4 \end{aligned} \quad (65)$$

Inertie moyenne des sections fissurée et non fissurée

$$I_{bm} = \frac{I_{bf} + I_{bh}}{2} = \frac{4,08 \times 10^6 + 6,36 \times 10^6}{2} = 5,22 \times 10^6 \text{ mm}^4 \quad (66)$$

4.5.2 Calculs des flèches

La flèche sous le poids des finitions vaut (figure 22a) :

$$w(g_{fin}) = 30,1 \frac{g_{fin} L^4}{I_{bm}} = 30,1 \frac{1,6 \times 10^3 \times 2,5^4}{5,22 \times 10^6} = 0,4 \text{ mm} \quad (67)$$

La flèche sous la charge utile vaut (figure 22b) :

$$\begin{aligned} w(q_k) &= 46,1 \frac{\psi_i q_k L^4}{I_{bm}} \\ &= 46,1 \frac{\psi_i 2,0 \times 10^3 \times 2,5^4}{5,22 \times 10^6} \\ &= 0,70 \psi_i \text{ mm} \end{aligned} \quad (68)$$

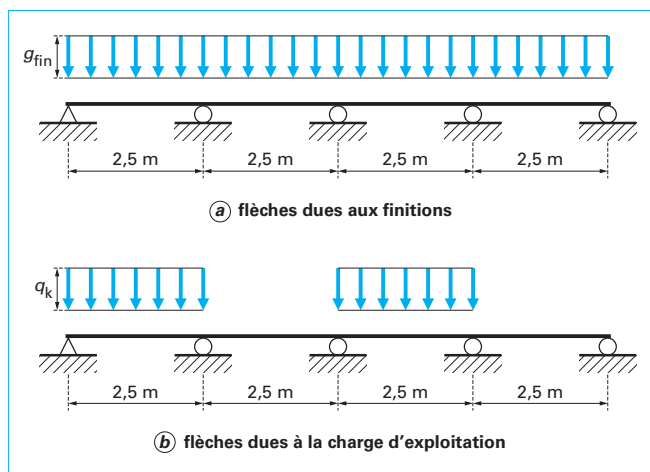


Figure 22 – Schémas statiques déterminant pour le calcul des flèches

4.5.3 Vérifications

Pour les cas de charges « fréquents » concernant la vérification d'une **rigidité suffisante** et du **confort**, seule la flèche sous la charge d'exploitation doit être considérée :

$$w_q = w(\psi_1 q_k) = 0,70 \times 0,5 = 0,4 \text{ mm} \quad (69)$$

La vérification est la suivante :

$$w_q = 0,4 \text{ mm} \leq w_{\text{lim}} = \frac{L}{350} = \frac{2\,500 \text{ mm}}{350} = 7,1 \text{ mm} \quad (70)$$

Pour les cas de charges « fréquents » concernant la vérification de l'**aptitude au fonctionnement**, la flèche sous le poids des finitions et de la charge d'exploitation doit être considérée :

$$w_{g+q} = w(g_{\text{fin}}) + w(\psi_1 q_k) = 0,4 \text{ mm} + 0,70 \times 0,5 \text{ mm} = 0,75 \text{ mm} \quad (71)$$

La vérification est la suivante :

$$w_{g+q} = 0,75 \text{ mm} \leq w_{\text{lim}} = \frac{L}{350} = \frac{2\,500 \text{ mm}}{350} = 7,1 \text{ mm} \quad (72)$$

Pour les cas de charge « quasi-permanents » concernant la vérification de l'**aspect**, il faut également considérer la flèche totale sous le poids des finitions et de la charge d'exploitation :

$$w_{g+q} = w(g_{\text{fin}}) + w(\psi_2 q_k) = 0,4 \text{ mm} + 0,70 \times 0,3 \text{ mm} = 0,6 \text{ mm} \quad (73)$$

La vérification est la suivante :

$$w_{g+q} = 0,6 \text{ mm} \leq w_{\text{lim}} = \frac{L}{300} = \frac{2\,500 \text{ mm}}{300} = 8,3 \text{ mm} \quad (74)$$

Les trois vérifications sont satisfaites.

4.6 État limite de service, vérification de l'ouverture des fissures du béton

Pour une dalle non étayée, on choisit le taux d'armature suivant :

$$\rho = \frac{A_s}{bh_c} \geq 0,2\% \quad (75)$$

L'aire nécessaire de la section d'armature vaut donc :

$$A_s \geq 0,2\% \times 1\,000 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} = 120 \text{ mm}^2 \quad (76)$$

Le choix du treillis soudé ($\varnothing 5 \text{ mm}/100 \text{ mm}$, $A_s = 196 \text{ mm}^2/\text{m}$) est satisfaisant.

4.7 État limite de service, vérification des vibrations

En assimilant les solives à des supports rigides et la dalle à une série de poutres mixtes juxtaposées, la fréquence fondamentale vaut :

$$f_0 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E_a I_{bh}}{m L^4}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{210 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \times 7,56 \times 10^{-6} \text{ m}^4}{508 \text{ kg/m} \times (2,5 \text{ m})^4}} = 14,1 \text{ s}^{-1} \quad (77)$$

La masse vibrante prise en compte comprend les charges permanentes ainsi que la moitié de la charge d'exploitation. Étant donné que $f_0 > 8,0 \text{ s}^{-1}$, les vibrations ne devraient pas être gênantes. Une analyse plus précise n'est donc pas nécessaire.