

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 128 (2002)
Heft: 03

Artikel: Nouvelle méthode de calcul des dalles mixtes à tôles profilées
Autor: Crisinel, Michel / Schumacher, Ann / Lääne, Ahti
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-80259>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 29.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Nouvelle méthode de calcul des dalles mixtes à tôles profilées

Bien que le produit «dalle mixte» soit un élément de construction simple, économique et présentant de nombreux autres avantages, les vérifications à effectuer par le calcul (sécurité structurale, aptitude au service) peuvent s'avérer longues et compliquées. C'est pourquoi les méthodes de calcul que l'on trouve dans les règles ou les guides de dimensionnement sont essentiellement empiriques, car basées sur des résultats d'essais effectués sur des dalles en vraie grandeur.

Une nouvelle approche permettant de déterminer le comportement sous charges des dalles mixtes est proposé dans cet article. Dans un modèle de calcul simple (la méthode de calcul simplifiée), celle-ci allie les lois usuelles ($\sigma-\epsilon$) de comportement des matériaux avec les résultats d'essais de cisaillement ($\tau-\sigma$) sur des éprouvettes de petites dimensions, afin d'obtenir la relation moment-courbure $M-\phi$ d'une section critique d'une dalle mixte fléchie. Contrairement à la plupart des méthodes développées récemment, elle ne fait pas appel à des calculs numériques par éléments finis, mais à de simples calculs «à la main» ou à l'aide d'une feuille de calcul informatique. Les résultats obtenus grâce à cette nouvelle approche ont été comparés avec succès à des simulations à l'ordinateur et à des essais en vraie grandeur.

Introduction

Dans un article publié à l'occasion des 80 ans du professeur Maurice Cosandey [1], nous annonçons la mise à disposition des praticiens d'une nouvelle méthode de calcul simple et rapide pour le dimensionnement des dalles mixtes. Cette méthode est en particulier utile aux ingénieurs pour résoudre des problèmes de dimensionnement en cas de situations spéciales (travées irrégulières par exemple), ainsi qu'aux fabricants de tôle profilée, pour le développement de nouveaux produits. Le but de notre article est de présenter cette méthode de dimensionnement des dalles mixtes, basée sur

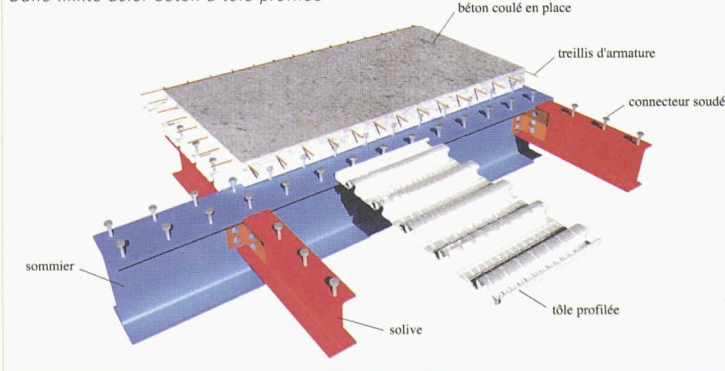
la contrainte de cisaillement longitudinal entre la tôle et le béton (déterminée par un simple essai sur des éprouvettes de petites dimensions), qui permet de trouver - à l'aide d'un modèle de calcul simplifié - la relation moment-courbure d'une section transversale de dalle mixte.

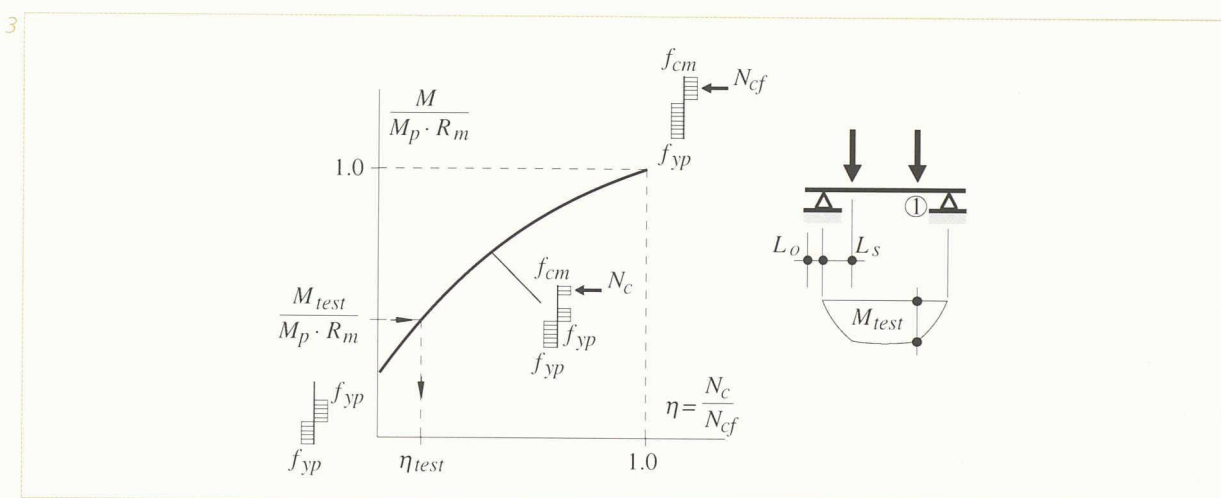
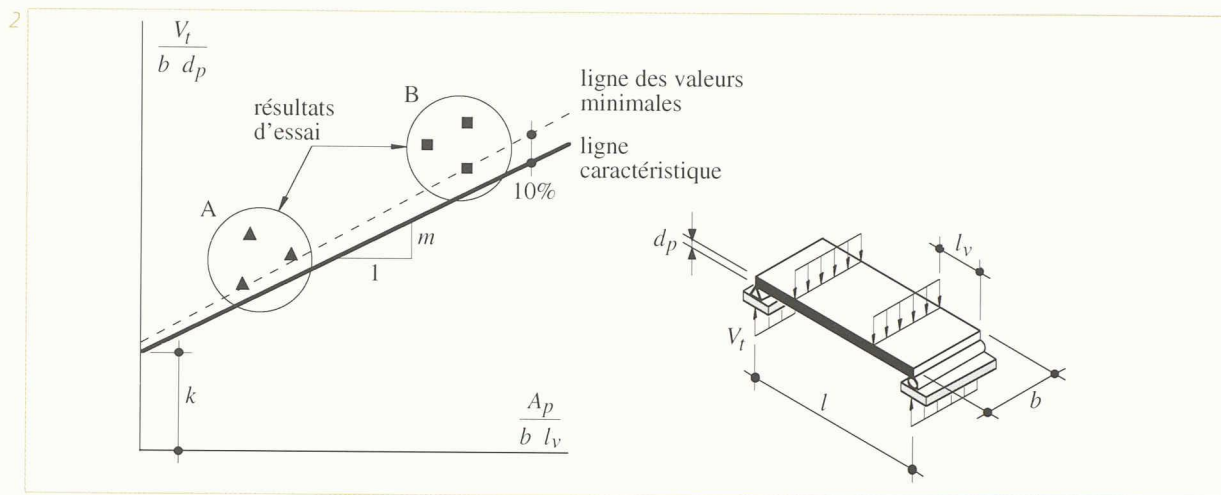
Motivation

L'utilisation d'une tôle mince profilée en acier, associée à une dalle de béton (fig. 1), constitue une solution de choix pour la construction de planchers. En effet, la mise en œuvre de tels composants structuraux contribue à une réduction des coûts lors de la construction (absence de coffrages, mise en place rapide, dimensions et poids réduits), de même qu'elle répond de manière satisfaisante aux exigences de sécurité, d'aptitude au service et d'économie requises pour les bâtiments administratifs, commerciaux ou d'habitation. Les dalles mixtes présentent cependant un comportement structural difficile à modéliser de façon simple.

C'est pourquoi les fabricants de tôles profilées mettent à disposition des architectes, ingénieurs et constructeurs des tableaux de charges ou des abaques de dimensionnement leur permettant de choisir facilement le profil approprié pour les épaisseurs et portées usuelles des planchers de bâtiment, sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des calculs compliqués. Cependant, les ingénieurs qui souhaitent justifier leur calcul (c'est-à-dire fournir une note de calcul) ou effectuer un

Dalle mixte acier-béton à tôle profilée





MÉTHODES USUELLES DE DIMENSIONNEMENT

Méthode «m-k»

Cette méthode est basée sur un programme expérimental et théorique d'envergure sur dalles mixtes réalisé aux Etats-Unis par Porter, Schuster et Ekberg [3] [4]. Au total, 353 éprouvettes ont été testées permettant de constater que le mode de rupture prépondérant des dalles mixtes est le cisaillement longitudinal. Ce travail conséquent a permis d'établir une standardisation des éprouvettes à travée simple, portant dans une seule direction. L'analyse des résultats a conduit à l'élaboration d'une méthode pour la vérification du cisaillement longitudinal appelée la méthode du «shear-bond». Elle a été reprise et légèrement modifiée en Europe sous le nom de méthode «m-k» [2].

Deux groupes d'essais de dalles en vraie grandeur sont nécessaires pour déterminer la droite de régression réduite ainsi que les facteurs m et k permettant de calculer la résistance ultime au cisaillement V_u (fig. 2). Le groupe A comprend des dalles de grande portée et le groupe B celles de faible portée. Cette droite est sensée représenter le mode de rupture par cisaillement longitudinal compris entre les modes de rupture par flexion (à gauche du groupe A) et par cisaillement vertical (à droite du groupe B).

La méthode *shear-bond* ou *m-k* est très simple d'utilisation, mais présente le désavantage d'être semi-empirique et d'avoir peu de signification physique; elle ne permet pas

d'expliquer clairement le mode de rupture par cisaillement longitudinal et n'est pas en conformité avec les méthodes de calcul usuelles utilisées pour le dimensionnement des structures mixtes. D'autre part, elle implique la réalisation de nombreux essais en vraie grandeur.

Méthode de la connexion partielle

Afin d'établir un modèle de dimensionnement plus proche du comportement physique des dalles mixtes réelles, Bode a proposé, dans le cadre de ses travaux à l'Université de Kaiserslautern [5], un diagramme de calcul en interaction partielle s'apparentant à la théorie de la connexion partielle utilisée pour les poutres mixtes. Cette méthode (fig. 3) a été adoptée en annexe de l'Eurocode 4 comme alternative à la méthode *m-k*. Elle n'est applicable qu'aux dalles mixtes présentant un comportement ductile (augmentation de la résistance globale après le premier glissement entre la tôle et le béton), mais elle permet de tenir compte d'ancrages éventuels aux extrémités de la dalle mixte, ce qui réduit le nombre requis d'essais en laboratoire en cas de dalles ancrées.

La méthode de la connexion partielle est également simple d'utilisation, mais elle nécessite aussi la réalisation de nombreux essais en vraie grandeur.

Fig. 2: Méthode «m-k»

Fig. 3: Méthode de la connexion partielle

Fig. 4: Tôles profilées utilisées en Europe

Fig. 5: Tôle profilée de la nouvelle génération (SD 225 decking)

dimensionnement pour une situation spéciale (dimensions non usuelles, travées irrégulières, etc.), ne disposent pas toujours de la méthode ayant servi à l'établissement de ces tableaux de dimensionnement, méthode d'ailleurs basée sur des résultats expérimentaux. De même, les fabricants de tôle qui souhaitent développer un nouveau profil pour dalle mixte ne possèdent pas les moyens théoriques de calculer leur produit avant de l'avoir fabriqué et testé en vraie grandeur, ce qui rend leur approche du profil optimal très onéreuse.

Les deux méthodes de vérification des dalles mixtes décrites dans l'Eurocode 4 [2] – soit la méthode «m-k» et la méthode dite de la connexion partielle (fig. 2 et 3), présentées dans l'encadré ci-contre – requièrent un programme d'essais composé d'au minimum six éprouvettes en vraie grandeur (longueur de 2 à 4 m, largeur env. 1 m et épaisseur entre 100 et 200 mm). Le nombre d'essais indispensables pour déterminer le comportement sous charge de service et sous charge maximale des divers produits existants sur le marché devient alors très important et très coûteux.

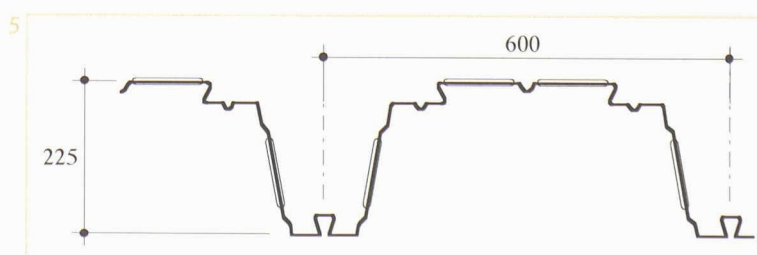
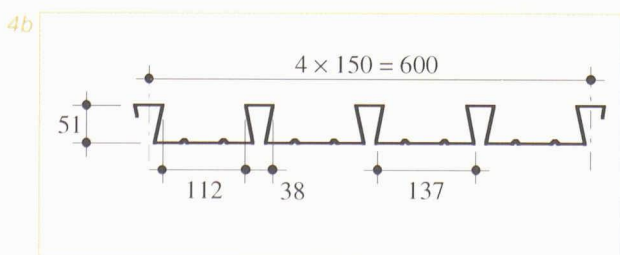
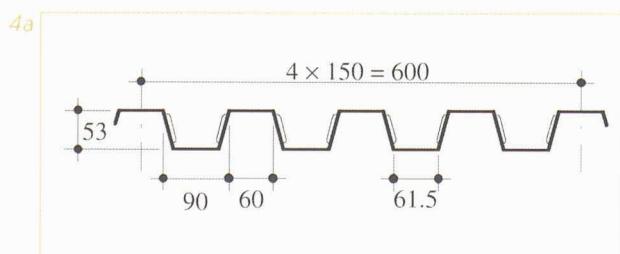
Le caractère semi-empirique de ces deux méthodes ne permet en outre pas d'explicitier le comportement physique de la liaison tôle-béton. Un modèle de calcul basé sur une interprétation physique de cette liaison, ainsi que des règles de conception et de dimensionnement en conformité avec ce modèle seraient d'une grande utilité pour faciliter le travail des praticiens. C'est pourquoi la mise au point d'une méthode simple et unique s'avère fondamentale pour le développement de ce genre d'élément porteur. Une telle méthode doit être basée sur un modèle théorique réaliste et sur un programme d'essai simple, peu coûteux, faisant appel à un nombre restreint d'éprouvettes de dimensions réduites.

Tôles profilées pour dalles mixtes

Une grande partie des produits acier utilisés en Europe pour la construction des dalles mixtes sont des profils à nervures ouvertes avec bossages (fig. 4a). Les avantages de ces tôles sont essentiellement liés à leur mise en œuvre. En effet, les nervures ouvertes permettent un empilage des éléments, ce qui réduit les volumes à transporter et assure une mise en place aisée grâce aux simples recouvrements latéraux et longitudinaux des plaques. Outre que ces avantages pratiques accélèrent singulièrement le montage, ces produits s'avèrent également économiques dans la mesure où leur fabrication nécessite moins de matière acier que les profils à nervures fermées ou rentrantes (fig. 4b).

Cela étant, les nervures rentrantes améliorent fortement la collaboration entre l'acier et le béton en s'opposant à la séparation des deux matériaux, ce qui accroît notablement la capacité globale de la dalle mixte. Un autre avantage reconnu de ce second type d'éléments est l'obtention d'une bonne résistance au feu de la dalle mixte sans armature supplémentaire.

Actuellement, la tendance est de créer des produits dont la section est de plus en plus grande et compliquée. La figure 5 donne un exemple de tôle profilée de cette nouvelle génération développée dans les années 1990. En effet, d'importants ajouts - en nombre et en dimension - de raidisseurs situés sur les parties planes des tôles en augmente la capacité portante au stade de construction (coffrage et bétonnage). Ces nouveaux produits comportent en général des nervures ouvertes et possèdent une petite nervure fermée entre deux grandes nervures ouvertes, ainsi que des bossages de grandes dimensions, placés sur les différentes faces de façon



à augmenter la liaison tôle-béton. Le but premier de ces bosages et des parties rentrantes est d'obtenir un comportement ductile de la dalle mixte. La tendance actuelle est donc au développement de produits dont les capacités en flexion et collaboration acier-béton sont optimisées.

Nouvelle approche

Du point de vue du dimensionnement, la dalle doit être vérifiée pour les trois états suivants:

- la tôle profilée comme plancher provisoire (plate-forme de travail) pendant la construction,
- la tôle profilée comme coffrage pour le bétonnage de la dalle,
- la dalle mixte après le durcissement du béton comme surface utile de plancher.

Nous n'examinons, dans cet article, que les méthodes de calcul de la tôle profilée en liaison avec le béton, soit les méthodes de calcul des dalles mixtes. Le calcul des tôles profilées au stade de la construction n'est pas traité, bien qu'il représente souvent le critère de dimensionnement prépondérant (tôles non étayées lors du bétonnage). Comme on l'a rappelé ci-dessus, deux méthodes de vérification des dalles mixtes sont utilisées en pratique en Europe: la méthode «m-k» [3], [4] et la méthode de la connexion partielle [5]. Toutes deux sont basées sur le fait que le mode de rupture prépondérant a lieu par cisaillement longitudinal dû aux efforts rasants.

Dans la pratique, l'ingénieur appelé à choisir un profil pour dalle mixte fait rarement appel à ces méthodes, préférant utiliser les *tableaux de charges* ou les *abaques de dimensionnement* mis à sa disposition par le fabricant de tôle profilée, documents qui lui donnent directement la charge admissible ou la portée maximale de la dalle. C'est toutefois à ces méthodes de vérification qu'il recourra, lorsqu'il est confronté à une situation spéciale (charges ou portées hors des indications fournies par les tableaux ou les abaques), ou s'il doit fournir un calcul justificatif pour un maître de l'ouvrage.

Les questions relatives au dimensionnement des dalles mixtes ont dès lors conduit de nombreux chercheurs à adopter une nouvelle approche passant par l'application de méthodes numériques. Les modèles développés permettent de simuler le comportement sous charge des dalles mixtes et de diminuer le nombre d'essais en vraie grandeur, voire de les supprimer. Or pour simuler numériquement le comportement des dalles mixtes, il est nécessaire de connaître le comportement des différents composants que sont la tôle profilée, la dalle en béton, l'armature et, surtout, le mécanisme de résistance à l'interface entre la tôle et le béton. Des

essais de cisaillement sur éprouvettes de petites dimensions ont donc été proposés pour déterminer ce comportement mixte en lieu et place des essais sur des dalles en vraie grandeur.

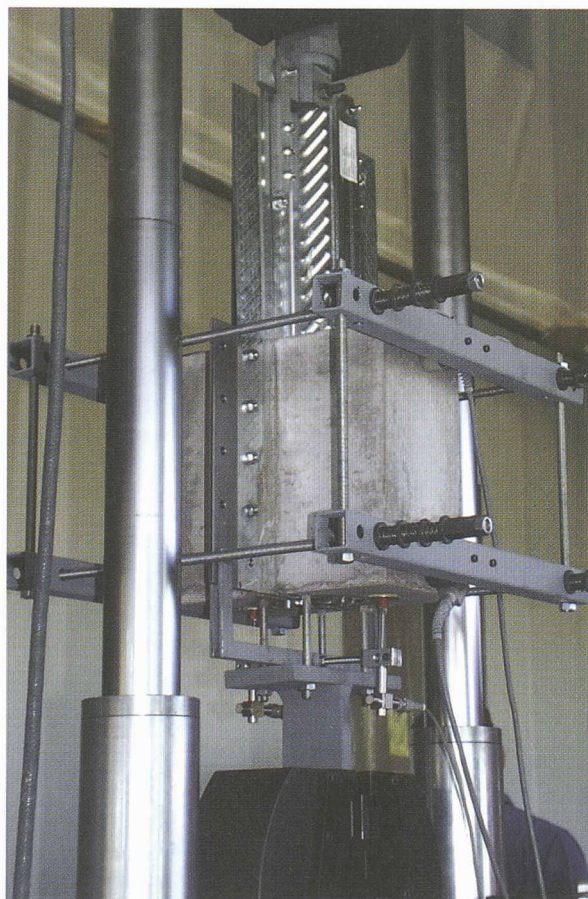
De tels essais livrent presque autant de renseignements que les essais de dalles, tout en étant moins coûteux et plus souples d'utilisation, en particulier dans la perspective du développement de produits. Ces simulations permettent en effet d'évaluer l'influence de divers paramètres sur le comportement des dalles, un seul essai de cisaillement d'un profil particulier suffisant par exemple à établir le comportement de l'interface déterminant pour l'analyse numérique d'un nombre indéterminé de dalles construites avec ce profil. Ainsi, grâce à une formule souple combinant essais sur petites éprouvettes et modèle numérique, on a pu mettre au point des méthodes de dimensionnement [6] [7] [8] affranchies des essais de dalles en grande dimension.

Les derniers travaux de recherche théorique effectués à l'ICOM-Construction métallique de l'EPFL ont conduit au développement d'une nouvelle approche permettant de prédire le comportement d'une dalle mixte [9]. Cette méthode simplifiée peut être appliquée aux dalles présentant un comportement ductile ou fragile. S'appuyant sur les caractéristiques géométriques de la dalle et les propriétés mécaniques des matériaux, elle y intègre les résultats de l'essai *pull-out* rappelés ci-après (relation entre la contrainte de cisaillement et le glissement, représentant le comportement à l'interface tôle-béton) pour décrire la relation moment-courbure d'une section de dalle.

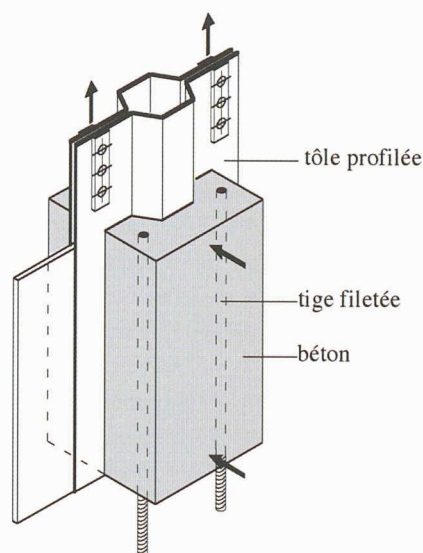
La prise en compte d'autres paramètres, tels que le frottement sur appui ou les ancrages aux extrémités des dalles est également possible, et la simplicité de la méthode repose sur des calculs pouvant être effectués à l'aide d'une feuille informatique, sans devoir recourir à un calcul par éléments finis.

Essais pull-out

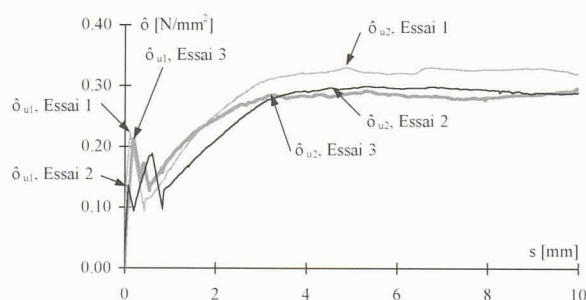
L'essai *pull-out*, développé par Daniels [6], permet d'obtenir une relation caractéristique de l'adhérence longitudinale tôle-béton pour chaque type de tôle, représentée par une courbe contrainte de cisaillement τ – glissement s . Chaque échantillon est composé de deux nervures identiques de tôle profilée, placées dos-à-dos et séparées par un fer plat. Les blocs de béton sont coulés sur les deux faces opposées des tôles profilées. L'éprouvette étant suspendue par les tôles profilées à la traverse supérieure d'une machine d'essai universelle, on applique une force de traction vers le bas sur les tiges filetées noyées dans les blocs de béton pour créer un effort de cisaillement longitudinal à l'interface tôle-béton. Deux



6a



6b



7

cadres horizontaux sont utilisés pour appliquer un jeu externe de forces latérales permettant d'éviter que les blocs de béton ne se séparent complètement de la tôle et de recréer un effort normal à l'interface - effort qui existe dans les conditions réelles de chargement des dalles mixtes (effet du poids propre et des charges agissant sur la dalle). Les figures 6a et 6b illustrent la réalisation de l'essai pull-out.

Les premiers développements ont impliqué quinze séries d'essais pull-out réalisées sur des éprouvettes mettant en œuvre dix profils différents [10]. Récemment, dix nouvelles séries de trois éprouvettes ont été réalisées, dont une partie sur les mêmes profils que les séries d'origine et une autre sur de nouveaux profils. Pour ces nouvelles séries, le mode de mise en charge a également été amélioré de façon à simplifier la procédure d'essai [11].

Les variables examinées étaient les dimensions et la forme des nervures, l'épaisseur de la tôle, le type de bossages et le revêtement de protection contre la corrosion. Les résultats obtenus s'établissent selon la figure 7.

Contrainte de cisaillement au premier glissement ($\tau_{u,1}$)

Le premier glissement se produit lorsque la liaison chimique entre la tôle et le béton se rompt. Comme les essais l'ont montré, cette liaison - due à l'adhérence entre la pâte de ciment et la tôle en acier revêtu - ne présente pas une résistance au cisaillement longitudinal très uniforme (fig. 7), ce qui peut signifier que son comportement dépend largement de l'état de surface de la tôle. Une autre explication peut impliquer les propriétés d'adhérence de la pâte de ciment, qui seraient influencées par les adjuvants du béton. En

Fig. 8: Comportements τ -s obtenus à l'aide d'un essai pull-out et courbes modélisées correspondantes

Fig. 9: Relation moment-courbure trilineaire

Fig. 10: Représentation des trois phases de comportement d'une section critique

réalité, d'autres facteurs sont encore susceptibles d'agir significativement sur cette adhérence, par exemple l'âge du béton ou la passivation du revêtement de protection en zinc. Aussi, la valeur de la charge au premier glissement doit-elle être considérée avec précaution, car les conditions de surface de la tôle sur les chantiers ne peuvent pas être contrôlées comme elles le sont en laboratoire, en particulier pour les dalles à comportement fragile, dans lesquelles la contrainte de cisaillement au premier glissement est déterminante pour le calcul de la résistance ultime.

Contrainte de cisaillement maximale ($\tau_{u,2}$)

La connexion mécanique, due à l'emboîtement physique du béton et de la tôle en acier, dépend de la géométrie du profil, de la hauteur des nervures ainsi que de la direction et de la forme des bossages de la tôle. Les résultats d'essai montrent que, pour un profil donné, la valeur de la charge maximale est relativement uniforme (fig. 7).

Une campagne d'essais interlaboratoires est actuellement organisée, dans le but de montrer la *répétabilité* des essais pull-out au sein d'un même laboratoire et la *reproductibilité* des résultats entre plusieurs laboratoires. L'objectif final est de définir très précisément les modes opératoires de préparation des éprouvettes et d'expérimentation, afin de valider la procédure d'essai pull-out proposée. La qualité globale (essais et méthode de calcul) pourra ainsi être améliorée grâce au dialogue entre laboratoires et à la mise en commun des connaissances et expériences réciproques.

Modèles de comportement

Section

Le modèle physique représentant la dalle mixte dans cette nouvelle méthode simplifiée peut être comparé à celui d'une

poutre mixte. La tôle profilée est modélisée sous la forme d'une *section en double té* de mêmes aire et moment d'inertie que la section originale. De façon similaire, la dalle en béton est modélisée par une section *rectangulaire* d'aire et de moment d'inertie identiques à ceux de la section originale.

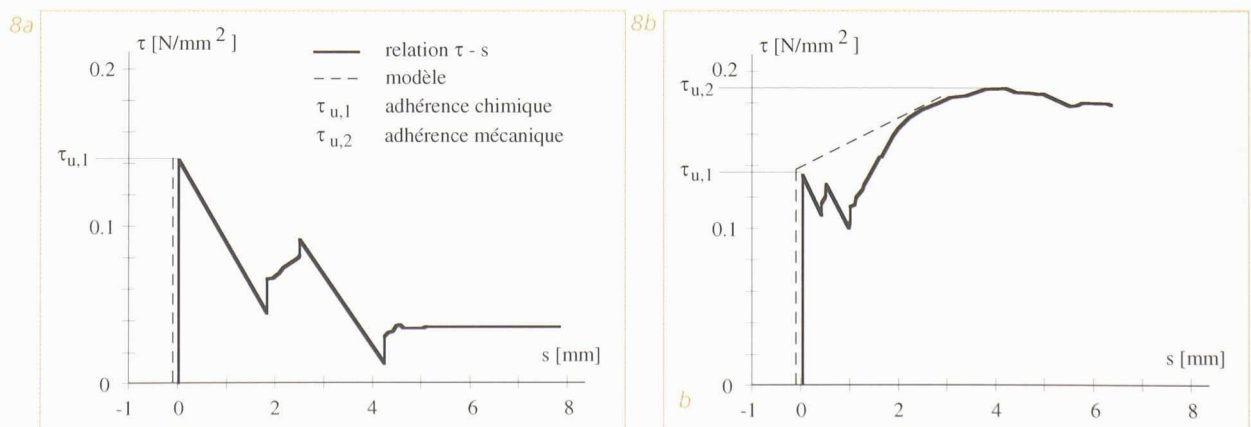
La loi de Bernoulli (les sections planes avant déformation restent planes après déformation) est admise dans l'entier de la méthode. De plus, on considère que les courbures des composants acier et béton sont identiques avant et après glissement à l'interface, ce qui veut dire qu'aucune séparation verticale n'a lieu entre la tôle profilée et la dalle en béton. Le comportement de la section mixte est déterminé dans une section critique, par exemple à l'endroit du moment de flexion maximal en travée.

Matériaux

Le comportement de l'acier (tôle profilée) est admis élastique-parfaitement plastique (en traction et en compression) de même que celui du béton en compression. Le comportement du béton en traction est admis élastique avec rupture fragile.

Connexion tôle-béton

Les caractéristiques de la *connexion tôle-béton* sont traitées comme une donnée d'entrée essentielle dans la nouvelle méthode simplifiée. Elles sont obtenues à l'aide de l'essai pull-out dont le résultat comprend deux variables: la force F , appliquée à l'éprouvette, et le glissement à l'interface entre la tôle et le béton. Cette relation doit être transformée en une relation entre la contrainte de cisaillement τ et le glissement s (fig. 8a et 8b), dans laquelle la contrainte τ est considérée comme uniformément répartie sur la surface projetée du béton.



Pour les dalles présentant un comportement *fragile* (fig. 8a), on utilise un modèle élastique-parfaitement fragile pour représenter le comportement $\tau-s$ de la connexion. La valeur $\tau_{u,1}$ est utilisée comme *contrainte caractéristique de cisaillement longitudinal* dans la méthode simplifiée.

Pour les dalles présentant un comportement *ductile* (fig. 8b), deux valeurs caractéristiques de la contrainte de cisaillement longitudinal doivent être considérées : la valeur $\tau_{u,1}$ atteinte lors du premier glissement et la valeur maximale $\tau_{u,2}$ (avec le glissement correspondant) mesurée lors de l'essai *pull-out*.

Principes de la méthode

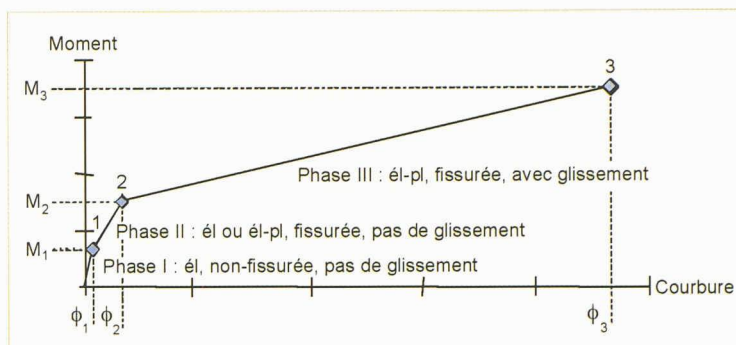
La méthode est basée sur la détermination d'une relation moment-courbure trilineaire de la section critique d'une dalle mixte. Chaque portion de cette relation représente une phase particulière du comportement de la section (fig. 9):

- *phase I* : comportement linéaire élastique, sans fissuration du béton tendu et sans glissement à l'interface tôle-béton (interaction totale entre les deux composants);
- *phase II* : comportement élastique ou élasto-plastique, avec fissuration du béton tendu mais sans glissement à l'interface tôle-béton (interaction totale);
- *phase III* : comportement élasto-plastique non linéaire, avec fissuration du béton tendu et glissement à l'interface tôle-béton (interaction partielle).

En complément à ces trois phases, il est également possible de définir les trois points qui correspondent à la borne supérieure de chacune d'entre elles:

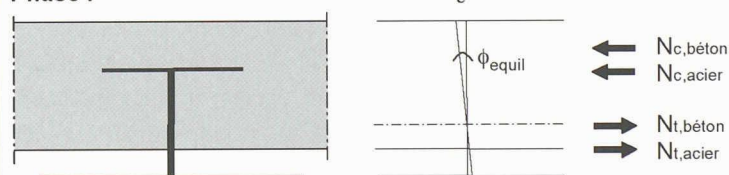
- *point 1* : début de la fissuration du béton en traction;
- *point 2* : initiation du glissement entre la tôle profilée et la dalle en béton; atteinte de la contrainte maximale de cisaillement longitudinal $\tau_{u,1}$ due à l'adhérence chimique (pour les dalles à caractère fragile, ce point représente la rupture de la connexion, soit le moment maximal qui peut être atteint);
- *point 3* : atteinte de la contrainte maximale de cisaillement longitudinal $\tau_{u,2}$ due à la connexion mécanique; rupture de la connexion (glissement infini).

La figure 10 représente la section transversale modélisée, la répartition des déformations sur la hauteur de la section et les forces résultantes pour les trois points caractéristiques du comportement décrits ci-dessus. On y retrouve également les trois phases décrites plus haut et représentées sur la figure 9. Les coordonnées (ϕ, M) des trois points sont déterminés par équilibre des forces agissant sur la section transversale correspondante.



9

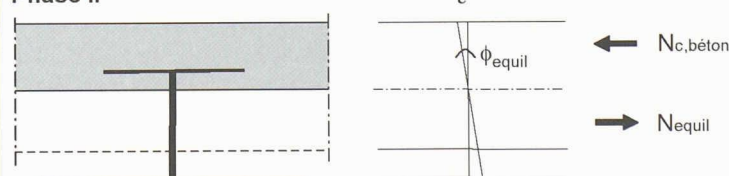
Phase I



Point 1 (limite sup. phase I) : début de la fissuration du béton.

$$\Sigma N = 0 \Rightarrow [\phi_1, M_1]$$

Phase II

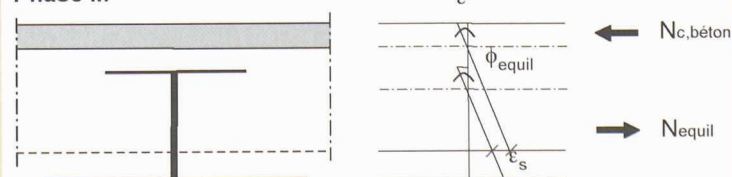


Point 2 (limite sup. phase II) : $\tau_{u,1}$ atteint, initiation du glissement.

$$\Sigma N = 0, N_{c,béton} = N_{equil} = \tau_{u,1} \cdot b \cdot v$$

$$\phi_{equil} = fnc(N_{equil}, \dots) \Rightarrow [\phi_2, M_2]$$

Phase III



Point 3 (limite sup. phase III) : $\tau_{u,2}$ atteint, rupture de la connexion.

$$\Sigma N = 0, N_{c,béton} = N_{equil} = \tau_{u,2} \cdot b \cdot v$$

$$\phi_{equil} = fnc(N_{equil}, \epsilon_s(\text{due au glissement}), \dots) \Rightarrow [\phi_3, M_3]$$

10

Résultats obtenus et comparaisons

Des comparaisons entre les résultats obtenus expérimentalement (essais de dalles), par simulation numérique (méthode des éléments finis) et par la nouvelle méthode simplifiée sont présentées à la **figure 11** sous forme de relations moment-courbure. Ces relations concernent la section critique de dalles mixtes (fragiles et ductiles) posées sur deux appuis et chargées par deux forces concentrées au quart de la portée ($l_v = l/4$ selon **figure 2**). En ce qui concerne les résultats expérimentaux, seuls les niveaux des moments au premier glissement ($M_{\text{essai,gliss}}$) et à la charge maximale ($M_{\text{essai,ult}}$) sont reportés sur les graphiques, les courbures n'ayant pas été mesurées lors des essais.

Les comparaisons montrent, d'une part une très bonne corrélation entre les résultats de la méthode simplifiée et les simulations numériques et, d'autre part, une assez bonne correspondance entre les valeurs des moments résistants calculés et ceux obtenus par les essais de flexion de dalles, aussi bien pour la charge au premier glissement que pour la charge ultime.

Pourquoi une nouvelle méthode de calcul?

Le lecteur peut à juste titre se poser la question de l'utilité d'une nouvelle méthode de calcul. Plutôt que de donner une réponse sous forme d'un exemple de calcul, nous présentons ici les avantages qu'elle apporte à l'ingénieur de structures et au fabricant de tôles profilées.

Pour l'ingénieur de structures

La tendance actuelle dans le domaine des structures du génie civil est à l'harmonisation des méthodes de calcul. L'exemple le plus marquant est l'élaboration des Eurocodes, qui devraient devenir la norme de dimensionnement unique

en Europe. Pour cela, il faut cependant qu'à l'intérieur de ces codes, des principes de dimensionnement identiques soient appliqués à la vérification d'éléments porteurs de même type (les poutres mixtes et les dalles mixtes par exemple).

Comparons les façons de calculer les résistances des sections pour ces deux types d'éléments mixtes:

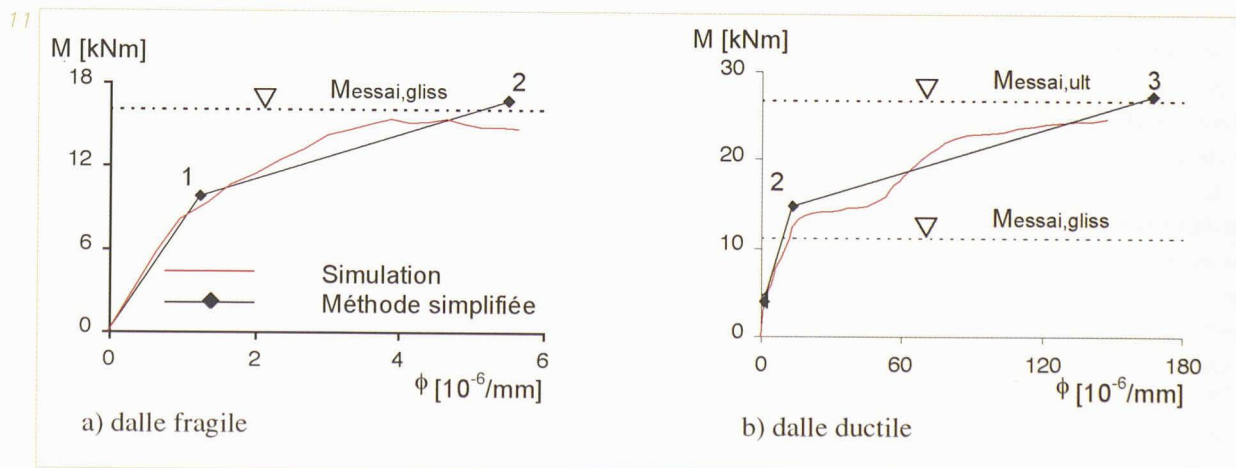
Poutre mixte

- *calcul de la résistance à la flexion*: à l'aide de la répartition des contraintes donnée par la courbure de la section;
- *calcul de la résistance au cisaillement vertical*: seule l'âme de la poutre métallique participe à la résistance;
- *calcul de la résistance au cisaillement longitudinal*: le nombre nécessaire de connecteurs dépend de l'effort rasant à l'interface; la résistance des connecteurs est donnée par des essais sur éprouvettes de type *push-out*.

Dalle mixte

- *calcul de la résistance à la flexion*: à l'aide de la répartition des contraintes donnée par la courbure de la section;
- *calcul de la résistance au cisaillement vertical*: seule la dalle en béton participe à la résistance; on assimile ici la dalle mixte à une dalle en béton armé;
- *calcul de la résistance au cisaillement longitudinal*: à l'aide d'essais de dalles en vraie grandeur.

La *méthode proposée* tend à harmoniser les calculs de la résistance au cisaillement longitudinal de ces deux types d'éléments mixtes en remplaçant les essais en vraie grandeur de dalles par des essais sur éprouvettes de type *pull-out*. La résistance à la flexion est ensuite déterminée en appliquant une courbure à la section mixte jusqu'à obtenir la rupture de la connexion par dépassement de la résistance au cisaillement longitudinal (analogue au phénomène qui se produit dans les poutres mixtes à connexion partielle).



Ainsi, grâce aux valeurs de la contrainte de cisaillement τ donnée par l'essai *pull-out* et à l'aide d'une feuille de calcul *Excel* permettant de trouver la relation $M-\phi$ pour le système statique donné, l'ingénieur est en mesure de vérifier n'importe quelle situation de dalle mixte grâce au moment résistant partiel trouvé.

Pour le fabricant de tôles profilées

Le problème auquel le fabricant est confronté est d'améliorer les performances des dalles mixtes, tout en minimisant son investissement financier. Actuellement, pour être en mesure d'offrir des tableaux de charges ou des abaques pour un seul profil, il doit réaliser au minimum six essais de dalles en vraie grandeur. Ce nombre augmente avec certains paramètres (type de revêtement de la tôle, ancrages d'extrémité, etc.) et peut représenter un coût important. Si le fabricant veut améliorer son produit en changeant la forme du profil ou en modifiant les bossages, il doit d'abord créer et construire l'outil de profilage, puis réaliser les essais de dalles en vraie grandeur. Cela peut impliquer des coûts encore plus importants.

Grâce à la méthode proposée, le fabricant peut confectionner manuellement des échantillons de profils, les bétonner (fig. 6) et les soumettre à des essais *pull-out* bon marché. Il pourra ainsi développer et mettre sur le marché un nouveau produit de façon économique. Les tableaux de charges ou les abaques peuvent également être produits à l'aide de la méthode simplifiée sans passer par les essais en vraie grandeur.

Conclusions

La nouvelle méthode simplifiée présentée dans cet article permet de déterminer, en trois phases de comportement, la résistance ultime à la flexion des dalles mixtes par le calcul de la relation moment-courbure d'une section mixte. Elle fait appel aux caractéristiques géométriques de la dalle, aux propriétés des matériaux utilisés (acier et béton) et aux propriétés de la liaison, données par des essais sur éprouvettes de petites dimensions.

Certains aspects théoriques de la méthode doivent encore être analysés, afin de la rendre utilisable de façon plus générale. Il s'agit en particulier des points suivants:

- la répartition des contraintes de cisaillement le long de la dalle,
- la séparation verticale entre la tôle profilée et le béton,
- la réduction de la connexion mécanique due à l'allongement de la tôle par flexion,
- l'application de la méthode à des sections de la dalle autres

que la section critique en travée et à d'autres types de chargement (par exemple non uniforme ou asymétrique),

- l'application de la méthode d'essai aux profils à caractère fragile.

Remerciements

Pour leur appui financier dans le cadre de cette recherche appliquée, les auteurs expriment leur reconnaissance à la *Fondation pour la recherche appliquée dans le domaine du béton* (TFB) de l'*Industrie suisse du ciment*, ainsi qu'à la *Commission pour la technologie et l'innovation* (CTI) de l'Office fédéral de la formation professionnelle et de la technologie. Ils remercient également sincèrement MM. Pascal Guignard de *Tuchs Schmid Engineering AG*, à Frauenfeld, et Thomas Lang, du bureau *smt + partner ag*, à Berne, tous deux anciens collaborateurs scientifiques de l'ICOM-EPFL, de leur contribution au développement de la méthode.

Références

- [1] CRISINEL, MICHEL et HIRT, MANFRED A.: «La recherche sur les dalles mixtes», *Ingénieurs et architectes suisses*, N° 4, février 1998, p. 39-43
- [2] ENV 1994-1-1 Prénorme européenne, Eurocode 4, «Conception et dimensionnement des structures mixtes acier-béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments», Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, octobre 1992
- [3] SCHUSTER, R. M.: «Composite Steel-Deck-Reinforced Concrete Systems Failing in Shear-Bond», Preliminary Report Ninth Congress IABSE Amsterdam, éd. IABSE, Zurich, 1972, pp. 185-191
- [4] PORTER, M. L., EKBERG, C. E. JR.: «Design Recommendations for Steel Deck Floor Slabs», *ASCE Journal of the Structural Division*, vol. 102, N° 11, New York, 1976, pp. 2121-2136
- [5] BODE H., SAUERBORN, I.: «Zur Bemessung von Verbunddecken nach der Teilverbundtheorie», *Stahlbau* N°61 (1992), Heft 8, pp. 241-250
- [6] DANIELS, B. J.: «Comportement et capacité portante des dalles mixtes: modélisation mathématique et étude expérimentale», thèse N° 895, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1990
- [7] PATRICK, M.: «Shear Connection Performance of Profiled Steel Sheeting in Composite Slabs», thesis, School of Civil and Mining Engineering, The University of Sydney, 1994
- [8] VELJKOVIC, M.: «Behaviour and Resistance of Composite Slabs - Experiments and Finite Element Analysis», doctoral Thesis, University of Technology, Luleå, Sweden, 1996
- [9] GUIGNARD, P., SCHUMACHER, A., CRISINEL, M.: «Etude des dalles mixtes et développement d'une méthode de calcul basée sur la relation moment-courbure», rapport ICOM 381, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2001
- [10] DANIELS, B. J.: «Shear Bond Pull-Out Tests for Cold-Formed Steel Composite Slabs», rapport ICOM 194, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1988
- [11] LÄÄNE, A., EDDER, Ph.: «Pull-out tests on steel-concrete composite slab small-scale specimens», rapport ICOM, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, (à paraître).