

Recherches en cours et perspectives d'avenir :

Dalles mixtes acier-béton avec tôle profilée

par M. Michel Crisinel, ing. civil dipl. EPFL/SIA, Institut de statique et structures,
ICOM - construction métallique, EPF Lausanne.

Introduction

Dans un récent article [1], nous faisons le point de la situation concernant les connaissances actuelles sur les dalles mixtes composées d'une tôle d'acier profilée recouverte de béton. On y rappelait notamment que ce type de dalle, très courant dans les bâtiments à charpente métallique, était connu aux USA dès les années 30 et qu'il avait fait son apparition en Suisse à la fin des années 50. Il s'agissait alors de tôles ondulées posées sur des poutrelles métalliques et recevant une dalle de béton comportant un treillis de répartition. La liaison tôle-béton était assurée par simple adhérence, sauf dans certains cas exceptionnels où le treillis de répartition était soudé sur les ondes de la tôle. La liaison dalle-poutrelle, permettant de considérer l'ensemble comme une poutre mixte acier-béton, était réalisé par soudure de la tôle à fond d'onde. Des essais en laboratoire avaient permis de confirmer le comportement mixte d'un tel plancher, solution pionnière pour l'époque en Europe.

Vers le milieu des années 60 est apparue en Suisse la première tôle profilée conçue spécialement pour les dalles mixtes, la tôle Holorib (fig. 1). Une série d'essais effectués sur ces tôles et sur des tôles ondulées avait abouti à la mise au point d'une méthode de calcul qui fut ap-

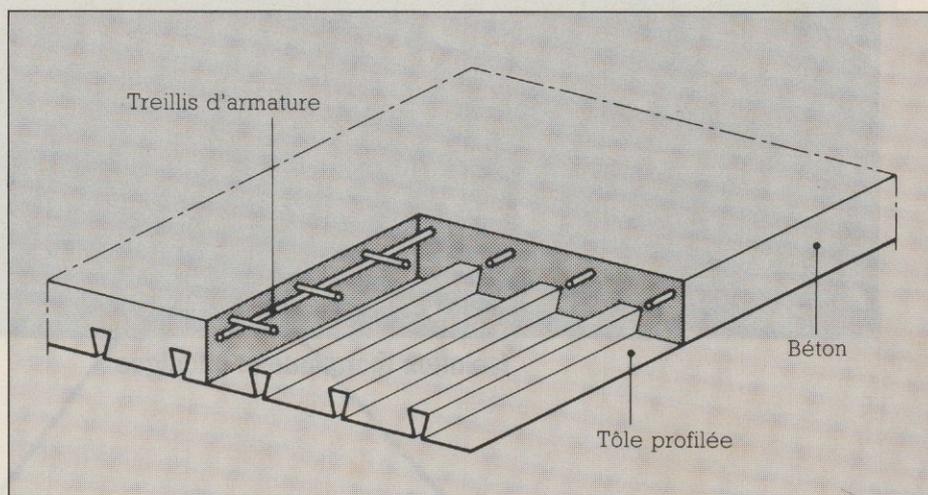


Fig. 1. - Dalle mixte.

pliquée par la suite à d'autres types de dalles mixtes. Cette méthode sert d'ailleurs toujours de base aux tables de dimensionnement des dalles mixtes, avec les tôles profilées livrables actuellement en Suisse [2]. Elle avait été développée pour les tôles lisses ne com-

portant aucun bosselage et était basée sur les *contraintes admissibles*. Elle rendait nécessaire, dans la plupart des cas, la mise en place d'ancrages aux extrémités de la dalle, afin d'éviter le glissement acier-béton qui provoque la ruine du système (fig. 2).

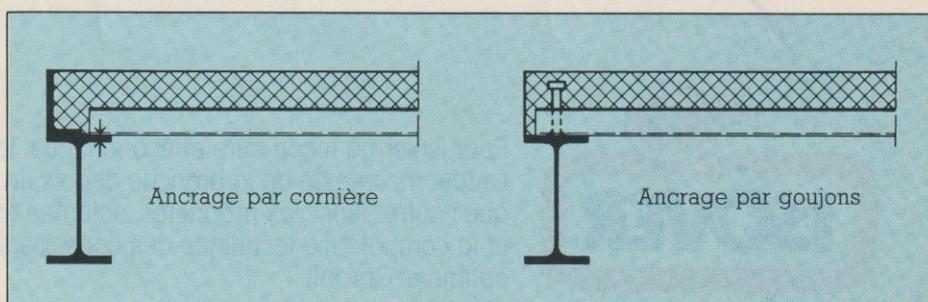


Fig. 2. - Ancrages sur appui de rive.

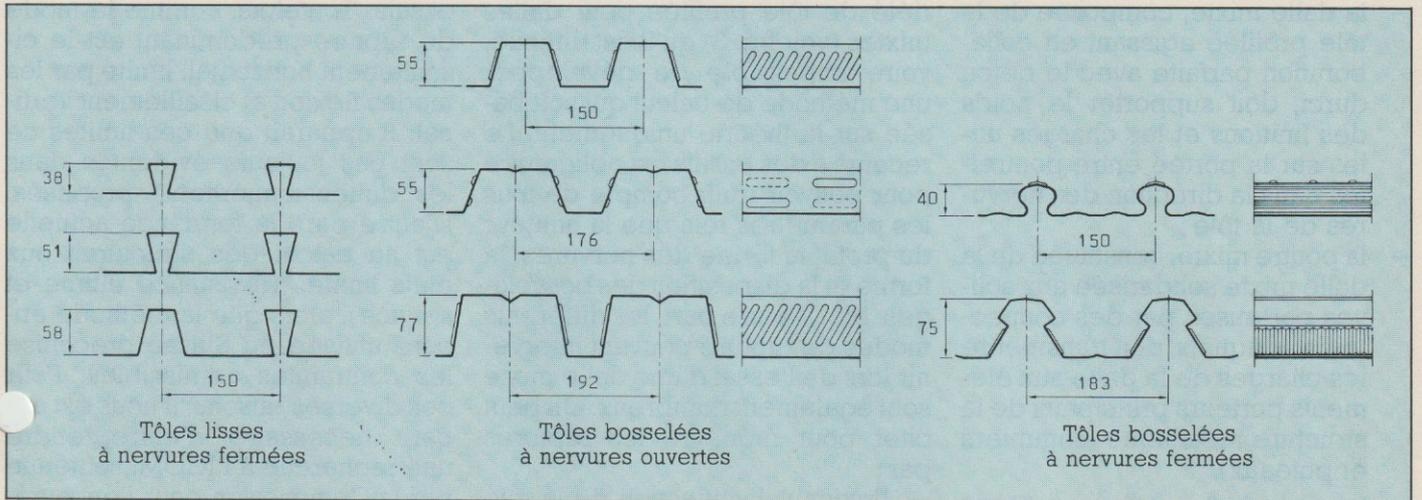


Fig. 3. - Principaux types de tôles profilées pour dalles mixtes, livrables en Suisse.

Plus tard d'autres tôles profilées pour dalles mixtes (fig. 3) sont apparues sur le marché, en particulier des tôles comportant des bosselages sur les âmes. Développées aux Etats-Unis également, ces tôles ont fait l'objet de nombreuses recherches, essentiellement expérimentales, qui ont abouti à la mise au point d'une nouvelle méthode de calcul basée sur des critères de rupture par cisaillement longitudinal. Actuellement, cette *méthode empirique* a été adoptée dans les normes britanniques [3] et américaines [4]. Elle figure également dans le projet d'Eurocode 4 [5] en consultation auprès des pays membres de la CEE.

Avantages

Rappelons quelques-uns des avantages bien connus de ce type de construction :

- la tôle profilée sert de coffrage permanent à la dalle en béton qui est coulée *in situ*, ce qui permet d'éviter dans la plupart des cas un étayage ;
- la tôle profilée une fois posée constitue immédiatement une plate-forme de travail pour procéder aux opérations de construction de la dalle ;
- la tôle profilée joue le rôle d'armature inférieure de la dalle, ce qui supprime la pose d'une armature traditionnelle. Des bar-

res d'armature supérieures, disposées sur appuis, permettent d'assurer la continuité de la dalle. Une barre d'armature inférieure par nervure permet d'augmenter la résistance au feu de la dalle mixte ;

- les nervures de la tôle profilée conduisent à une réduction sensible du poids propre de la dalle et, par conséquent, à une réduction des charges totales agissant sur les fondations ;
- les tôles profilées peuvent être facilement transportées, entreposées et manipulées grâce à leur forme et leur légèreté.

Globalement, ces avantages peuvent considérablement raccourcir le temps de construction d'un bâtiment, avec toutes les retombées économiques que cela suppose.

Aspects relatifs au calcul

Du point de vue dimensionnement, les trois aspects suivants doivent être considérés :

- la tôle profilée doit être suffisamment résistante et rigide pour supporter le poids du béton frais et les charges temporaires intervenant pendant le bétonnage (fig. 4) ;

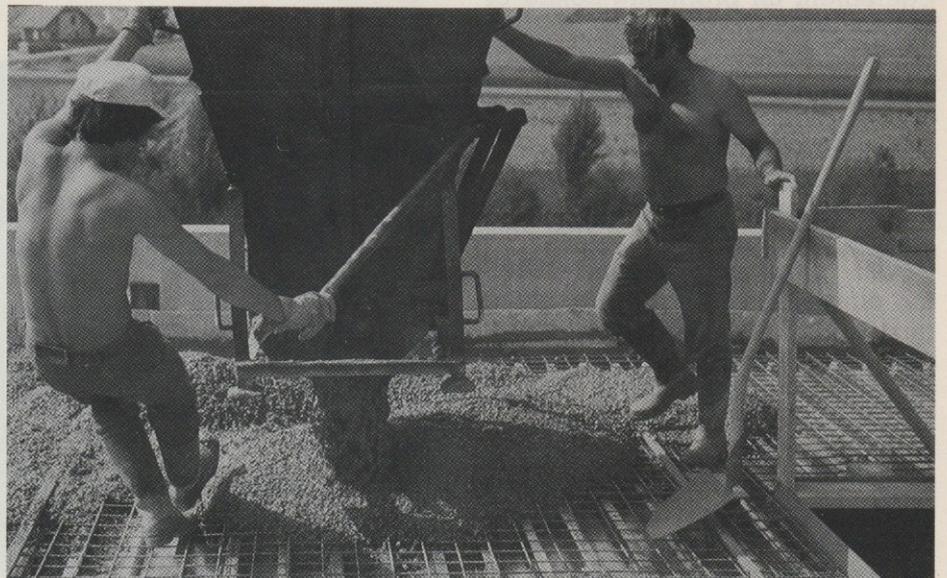


Fig. 4. - Dalle mixte en cours de bétonnage. On remarque la charge temporaire provoquée par les ouvriers et par l'accumulation locale du béton frais.

- la dalle mixte, composée de la tôle profilée agissant en collaboration parfaite avec le béton durci, doit supporter le poids des finitions et les charges utiles sur la portée entre poutrelles dans la direction des nervures de la tôle ;
- la poutre mixte, constituée de la dalle mixte solidarifiée aux solives porteuses par des connecteurs adéquats, doit transmettre les charges de la dalle aux éléments porteurs principaux de la structure métallique (sommiers et poteaux).

Le calcul des tôles profilées comme coffrage, avant le durcissement du béton, est un problème maintenant résolu. Des recommandations européennes [6] ont été publiées à ce sujet et une brochure [7] réunissant la plupart des tôles profilées livrables en Suisse a été éditée récemment par l'ICOM (EPFL), grâce au soutien financier du Centre suisse de la construction métallique (SZS) et des fabricants et importateurs de tôles profilées. Cette publication donne les caractéristiques des profils nécessaires pour effectuer les vérifications exigées par les normes SIA, ainsi que des exemples de dimensionnement.

Le calcul des poutres mixtes est également un problème connu et résolu par la publication *Poutres mixtes dans le Bâtiment*, éditée en 1982 par le Centre suisse de la construction métallique [8]. On y trouve en effet la méthode qui permet de dimensionner les poutres mixtes comportant une dalle avec tôle profilée.

Par contre, la question relative au dimensionnement des dalles mixtes n'est pas résolue à satisfaction actuellement, tant en Suisse qu'en Europe. Bien que le produit « dalles mixtes avec tôle profilée » soit satisfaisant à plusieurs égards (construction, économie, esthétique, résistance au feu, capacité portante), il ne l'est pas entièrement pour l'ingénieur quant à la façon de le dimensionner. En effet, il existe sur le marché une telle va-

riété de tôle profilée pour dalles mixtes (voir fig. 3) qu'il est difficile, voire impossible de développer une méthode de calcul qui soit basée sur la théorie uniquement. Le recours à des essais est obligatoire pour pouvoir tenir compte de tous les paramètres tels que la hauteur du profil, la forme des nervures, la forme et la disposition des bosselages, etc. D'autre part, les différents modes de rupture pouvant intervenir lors de l'essai d'une dalle mixte sont également nombreux. On peut citer pour mémoire les ruptures par :

- flexion (plastification de la tôle ou écrasement du béton) ;
- cisaillement vertical (sur appui ou près d'une charge concentrée) ;
- cisaillement horizontal (rupture de l'adhérence acier-béton, due au frottement, à la liaison mécanique, rupture des ancrages d'extrémité) ;
- séparation verticale.

Enfin le comportement sous charge peut être différent selon que la tôle est lisse ou bosselée, selon que la dalle est ancrée ou non, selon que la portée est grande ou faible.

Tous ces paramètres devraient implicitement être inclus dans les deux méthodes utilisées actuellement et citées dans l'introduction, puisqu'elles sont basées sur des

essais. Toutefois, comme le mode de rupture prédominant est le cisaillement horizontal, limité par les modes flexion et cisaillement vertical, il apparaît que ces limites ne sont pas toujours évidentes dans les dimensionnements proposés. D'autre part, la tendance actuelle est au calcul des structures aux états limites (résistance ultime et service), alors que la méthode encore utilisée en Suisse préconise les contraintes admissibles. Pour ces diverses raisons, il nous est apparu nécessaire d'entreprendre une recherche à l'ICOM, soutenue par la Commission pour l'encouragement de la recherche scientifique (CERS), dans le but d'analyser le comportement réel, jusqu'à la rupture, de dalles mixtes de n'importe quel type et de tenter de mettre à disposition du fabricant de tôle profilée, du constructeur de charpentes métalliques et de l'ingénieur une méthode de dimensionnement pratique et sûre.

Travaux de recherche

L'étude de la littérature [1] avait montré qu'il existe deux types de comportement possibles des dalles mixtes acier-béton soumises à un essai de charge (fig. 5) : le type fragile et le type ductile. Le premier est caractérisé par la perte complète de la capacité portante dès que le glissement entre la tôle

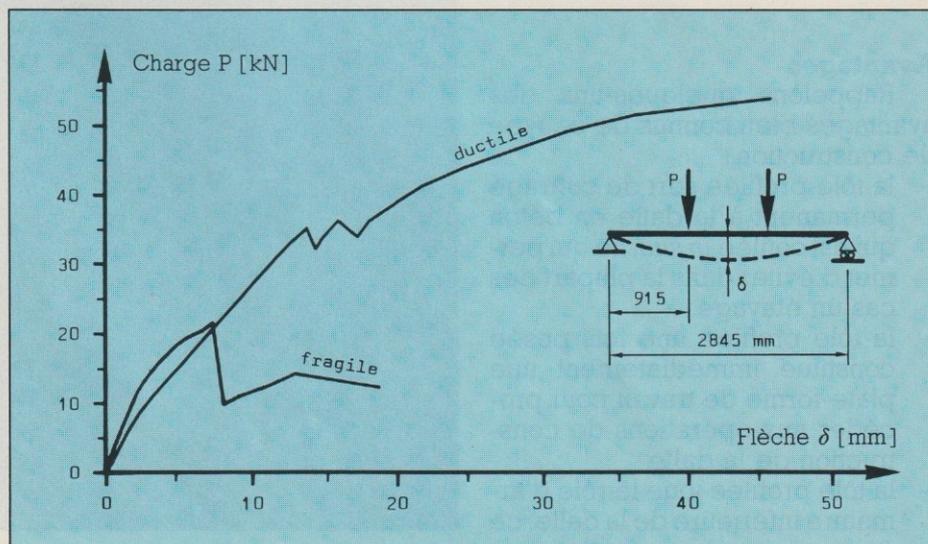


Fig. 5. - Deux comportements sous charges, typiques des dalles mixtes.

profilée et le béton apparaît à l'extrémité de la dalle. Il est typique des tôles lisses non ancrées. Le deuxième se différencie du premier par sa capacité d'atteindre des charges plus élevées que celles qui provoquent le glissement acier-béton, cela à un niveau de déformation très grand. Cette ductilité est due à la liaison mécanique, entre la tôle et le béton, réalisée par les bosselages ou par les ancrages d'extrémité. L'ICOM a donc entrepris une recherche expérimentale dont les buts étaient de confirmer les deux comportements cités ci-dessus et de poser les bases de la recherche théorique en vue du développement de la méthode de calcul souhaitée.

Trois séries d'essais de dalles mixtes avec différents profils, portées et épaisseurs ont été réalisés jusqu'à la rupture. La figure 6 présente l'un des essais en cours d'exécution. On remarque en particulier la grande ductilité de la dalle mixte, construite ici avec la tôle HI-BOND 55. La rupture a eu lieu dans ce cas par plastification de la tôle à mi-travée, accompagnée d'un glissement relatif acier-béton aux extrémités. Les rapports d'essais [9, 10] donnent tous les détails concernant la fabrication des dalles, les mises en charge, les mesures effectuées est les résultats obtenus. Les observations faites pendant ces essais ont permis de définir les hypothèses nécessaires à l'élaboration d'un programme de calcul par ordinateur permettant de connaître analytiquement le comportement d'une dalle mixte et de procéder à des comparaisons. Il est apparu qu'il manquait un élément essentiel pour arriver à ce résultat : le comportement de la liaison acier-béton. C'est pourquoi l'ICOM est actuellement en train de mettre au point un essai standard sur éprouvettes qui définira ce comportement et qui permettra de se passer des essais (coûteux) sur dalles mixtes en vraie grandeur. Cet essai standard et le programme de calcul permettront en particulier aux fabricants de dévelop-

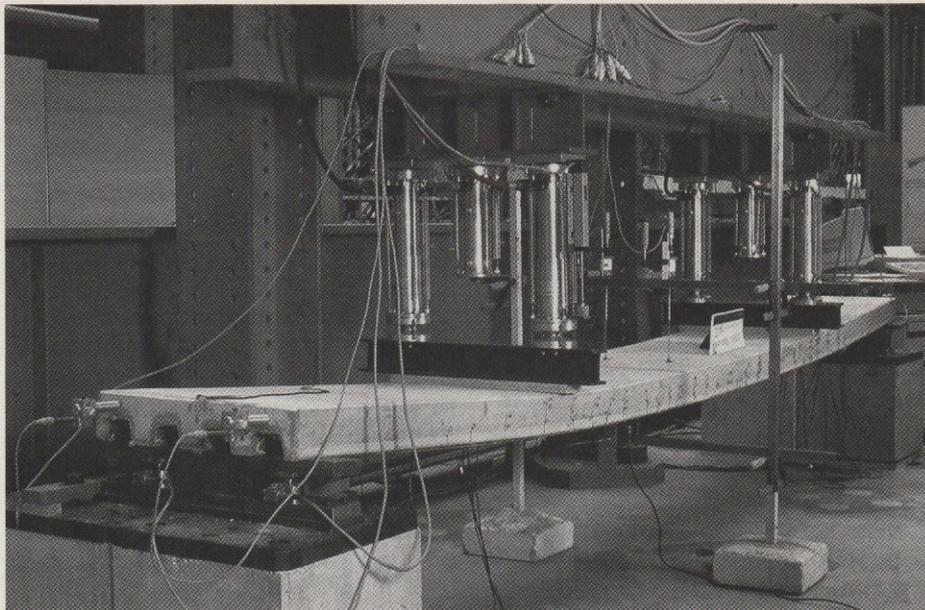


Fig. 6. — Essai de charge sur dalle mixte avec tôle profilée HI-Bond 55.

per de nouveaux profils de tôle, de nouveaux bosselages ou de nouvelles connexions mécaniques sans être obligés de fabriquer de grands prototypes de tôle profilée.

Résistance au feu

La résistance au feu des dalles mixtes acier-béton avec tôle profilée est une composante importante dans l'ensemble des critères de dimensionnement et des vérifications à effectuer. Grâce à la présence du béton, cette résistance est sensiblement plus élevée que celle d'une structure métallique non protégée, même si aucune mesure supplémentaire de protection contre le feu n'est adoptée. En cas de nécessité, la résistance au feu peut être amenée à n'importe quel niveau requis, par des moyens simples et fiables.

Jusqu'à ces derniers temps, le dimensionnement des dalles mixtes soumises au cas de charge incendie ne pouvait être basé que sur des essais de résistance au feu. Une telle procédure était longue et coûteuse et donnait parfois lieu à des fortes différences dues à la dispersion des résultats d'essais. Depuis peu, il existe une méthode de calcul mise au point par la Conven-

tion européenne de la construction métallique et récemment publiée par le Centre suisse de la construction métallique [11].

En règle générale, on peut affirmer que la résistance au feu des dalles mixtes acier-béton avec tôles profilées, sans mesures de protection contre le feu supplémentaires, est de trente minutes au moins. Cette règle est basée sur un critère de sécurité structurale (résistance) et sous-entend que les critères d'isolation (augmentation de la température à la face supérieure de la dalle) et d'intégrité (pénétration de flammes ou de gaz chauds) sont également satisfaits.

Les mesures de protection supplémentaires consistent en une armature supplémentaire, un revêtement isolant ou un plafond suspendu. Selon la résistance au feu exigée, on préférera, dans la mesure du possible, éviter toute protection supplémentaire ou se limiter à la première citée, soit l'armature supplémentaire. La note technique SZS-CECM [11] donne toutes les indications nécessaires pour déterminer :

- l'épaisseur minimale de la dalle pour respecter le critère d'isolation selon la résistance au feu requise ;

— la section de l'armature supplémentaire nécessaire pour porter la résistance au feu à une valeur supérieure à trente minutes.

Perspectives d'avenir

Un séminaire international s'est tenu à Stockholm en juin dernier sur le thème des éléments minces formés à froid utilisés dans le bâtiment. On y a présenté les nouveaux développements des matériaux de construction avec des tôles profilées à froid, utilisées seules ou en liaison avec d'autres matériaux tels que le béton ou les mousses polymères. La session sur la construction mixte acier-béton a révélé l'intérêt croissant de certains pays d'Europe pour les dalles avec tôle profilée, tels que la Grande-Bretagne ou la Suède où ce type de dalle était peu utilisé jusqu'à ce jour, contrairement à la Suisse. On peut en tirer les développements et perspectives suivants, qui s'appliquent aussi à notre pays situé au centre d'un marché européen.

a) Moyens de liaison

Les premières tôles profilées utilisées en Suisse étaient lisses (sans bosselage). Les faibles portées (2 à 3 m), les ancrages d'extrémités et la forme des nervures en faisaient (et en font toujours) un moyen de construction apprécié. Le resserrement des coûts a conduit petit à petit à la conception de tôles de plus grande capacité portante lors du bétonnage, pour pouvoir augmenter la portée sans étais et réduire les poids propres. La conséquence en est actuellement le remplacement de la nervure en queue d'aronde, qui exige plus de matière, par des nervures trapézoïdales comportant sur les âmes des bosselages destinés à créer la liaison acier-béton. La tendance va certainement s'accroître à l'avenir et il est à prévoir que cette liaison mécanique va se généraliser sur les tôles pour dalles mixtes. Il faudra alors que les fabricants fassent preuve d'imagination pour offrir aux constructeurs la meilleure con-

nexion possible sur le profil le plus performant.

Un développement actuel intéressant est le connecteur acier-béton proposé par Hilti [12]. Il s'agit d'une pièce métallique en forme de L, formée à froid, qui se fixe par clouage. L'avantage principal par rapport au connecteur traditionnel, le goujon soudé, est que le connecteur cloué ne nécessite ni soudage, ni courant électrique. D'autre part il permet de fixer la tôle sur les poutrelles sans moyens de fixation supplémentaires. Destiné en premier lieu à assurer la liaison acier-béton de la dalle avec la poutre, il joue également le rôle d'encrage pour la dalle mixte lorsque c'est nécessaire (en particulier pour les dalles à tôle lisse). Des recherches sont encore en cours pour augmenter la capacité portante de ces connecteurs et pour augmenter la gamme disponible.

b) Tôles profilées de grande portée

Afin de tirer le maximum des avantages des charpentes métalliques que sont la simplicité d'exécution et la rapidité de montage, il est nécessaire que la tôle profilée présente également ces mêmes avantages. Une solution qui se profile en Suède [13] et aux Pays-Bas [14] est la dalle mixte qui porte directement entre sommiers espacés de 5 à 6 m, sans poutres secondaires. Cela conduit à des tôles trapézoïdales de grandes hauteurs (jusqu'à 200 mm) et à des épaisseurs de dalle jusqu'à 250 ou 300 mm. Dans la solution hollandaise (fig. 7), la dalle reste légère grâce à des nervures de béton très étroites, alors que dans la solution suédoise (fig. 8), la dalle de béton est pleine, ce qui nécessite un étayage à mi-travée, mais garantit une meilleure isolation phonique. D'autre part dans cette dernière solution, la dalle est comprise dans

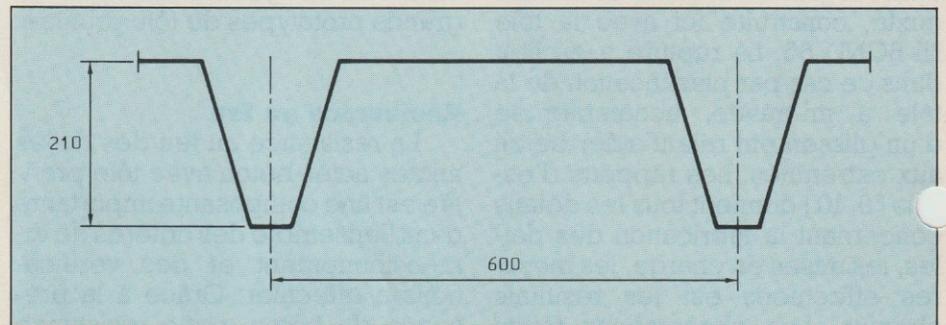


Fig. 7. — Profil pour longue portée Prins (Pays-Bas).

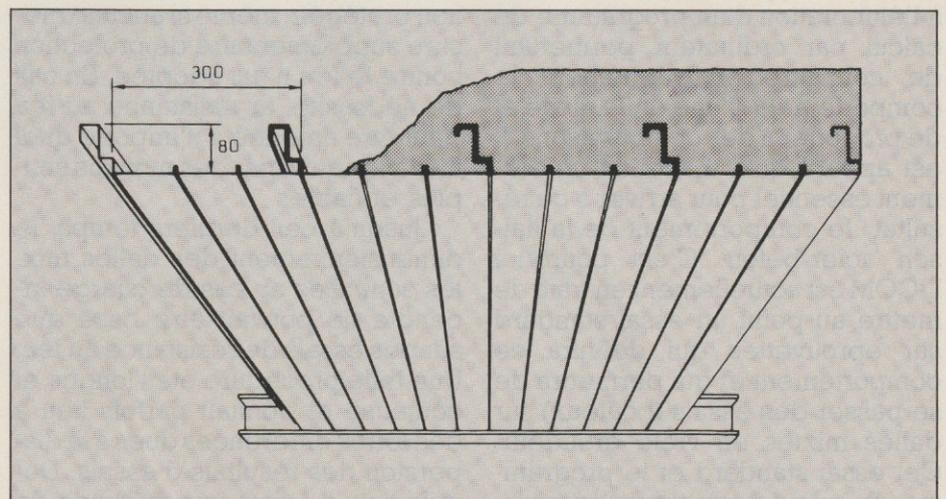


Fig. 8. — Dalle de grande portée réalisée avec des bacs Dobel BLK 300/80 (Suède).

la hauteur de la poutre sur laquelle elle s'appuie. Sans aller jusqu'à des portées semblables, remarquons qu'avec les profils actuellement disponibles en Suisse (hauteur maximale 70 à 80 mm, voir fig. 3), il est possible, moyennant un étayage qui n'est pas toujours gênant, quoi qu'on en dise, d'atteindre facilement des portées de 5 m. Cela nécessite évidemment une bonne connexion acier-béton que doivent fournir les bosselages de la tôle.

c) Esthétique de la face inférieure

Un des problèmes fréquemment évoqués par les ingénieurs et les architectes désireux de laisser apparente la face inférieure des dalles mixtes est l'aspect final de cette dernière. Trop souvent en effet, la face inférieure est souillée par des coulures de lait de ciment ou alors la tôle profilée présente dans les zones planes des cloquages inesthétiques provenant du profilage. Les moyens de résoudre ces problèmes sont les suivants :

- coulures de béton : il faut garantir que, lors du bétonnage, les recouvrements longitudinaux et transversaux de la tôle ne présentent pas d'ouvertures. Pour cela, il faut que le recouvrement latéral se situe en aile supérieure des nervures, avec si possible un emboîtement qui empêche la déformation des tôles, sinon il faut prévoir des attaches de couture (rivets pop ou vis autotaraudeuses). Pour le recouvrement transversal et les extrémités de tôles, il faut disposer des closoirs conçus à cet effet ou alors colmater les interstices et les extrémités de nervures ouvertes avec de la bande adhésive (fig. 9) ;
- cloquage des tôles : il est dû essentiellement à la libération, lors du profilage, des contraintes résiduelles existant dans la bobine de tôle mince suite au laminage à froid. Il est possible de supprimer les cloques en introduisant, dans la plage inférieure, une ou deux petites ner-

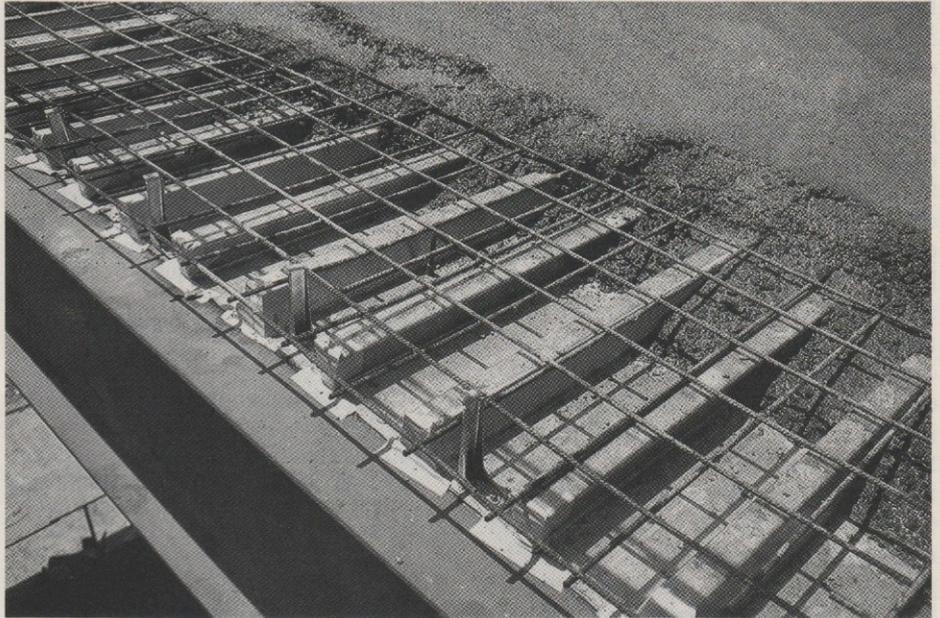


Fig. 9. — Exemple d'une bonne exécution de l'extrémité d'une dalle mixte. On remarque en particulier le treillis d'armature destiné à limiter les effets du retrait, les connecteurs Hilti destinés à fixer la tôle, à lier la poutre de rive à la dalle mixte et à empêcher le glissement entre la tôle et le béton, ainsi que les extrémités de nervures fermées par la bande adhésive afin d'empêcher les coulures de béton.

vures lors du profilage. Ces nervures ont de plus l'avantage de raidir la tôle et par là d'augmenter sa résistance. Remarquons toutefois que ces cloques de voilement se produisent surtout dans les tôles très minces et qu'elles n'ont pas d'effet sur la résistance.

Une autre façon d'améliorer l'esthétique des dalles mixtes est l'utilisation de tôles profilées dont la face inférieure comporte un revêtement prélaqué de couleur.

Conclusions

La dalle mixte acier-béton avec tôle profilée est un élément de construction moderne et efficace. Utilisée depuis de nombreuses années en Suisse et aux Etats-Unis, elle connaît actuellement un regain d'intérêt dans plusieurs pays d'Europe. Ce regain est dû principalement à des avantages du système qui deviennent déterminants dans la conjoncture actuelle des coûts de construction. Il s'agit d'une part de l'allègement de la structure dû aux nervures de la dalle et à l'amélioration de la liaison acier-béton

due aux développements de différents moyens de connexion nouveaux (bosselages de toute sorte, connecteurs cloués, etc.). Il s'agit d'autre part de l'augmentation de la portée que ces profils sont capables de franchir avec peu ou pas d'étayage, de façon à supprimer les éléments porteurs secondaires (solives). Ces deux premiers points rendent nécessaires des recherches théoriques et expérimentales de façon à bien saisir le comportement jusqu'à la rupture de ces éléments et à pouvoir proposer au fabricant de la tôle des moyens informatiques pour le développement de nouveaux profils et à l'ingénieur de structures des méthodes et des moyens de calcul simples et efficaces.

Un autre point d'intérêt de la dalle mixte est sa bonne résistance au feu, souvent suffisante sans moyen de protection supplémentaire. Le problème du feu, qui était souvent très pénalisant auparavant, ne l'est pratiquement plus actuellement, grâce aux meilleures connaissances que l'on a acquises par de nombreux essais et de nom-

breuses recherches qui ont abouti à des méthodes de calcul simples et pratiques.

Enfin le meilleur garant d'un produit de qualité est son aspect extérieur, que l'on pourra juger bon si chacun fait l'effort de construire de façon soigneuse. Il s'agit de l'ingénieur qui dimensionne et choisit la tôle adaptée à sa structure et à ses charges, du fabricant et fournisseur de la tôle qui livre un produit conforme aux exigences requises, du poseur qui respecte les règles de l'art lors de la manutention et de la fixation de la tôle et, finalement de l'entrepreneur de béton armé qui prend les précautions nécessaires lors du travail sur cette plate-forme qui lui est offerte, et lors de la mise en place du béton. Si chacun respecte ces règles élémentaires, la dalle mixte continuera d'être appréciée à juste titre par l'architecte et le maître de l'ouvrage.

Remerciements

L'auteur tient à remercier ici M. Byron Daniels, doctorant à l'ICOM, qui conduit la recherche théorique et expérimentale sur les dalles mixtes, recherche partiellement subventionnée par la Commission pour l'encouragement de la recherche scientifique (CERS). Il remercie aussi les fabricants de tôles profilées, les ingénieurs et les entrepreneurs de leurs conseils utiles à la rédaction de cet article. ■

Adresse de l'auteur

Michel Crisinel, ing. civil dipl. EPFL/SIA
Institut de statique et structures
ICOM-Construction métallique
Ecole polytechnique fédérale
de Lausanne
1015 Lausanne

M. Crisinel est membre du groupe « Blechverbunddecken » du Centre suisse de la construction métallique (SZS), chargé de la refonte des recommandations SZS B5 [2]. D'autre part, il vient d'être nommé président du Groupe de travail TWG 7/6 « Composite Slabs » du Comité technique TC 7 de la Convention européenne de la construction métallique (CECM).

Références bibliographiques

- [1] Crisinel M. Evolution et tendances actuelles des planchers mixtes acier-béton. Ingénieurs et architectes suisses ; Lausanne, vol. 111, n° 3, 1985, pp. 31-34.
- [2] Badoux J.-C. et Crisinel M. Recommandations pour l'utilisation de tôles profilées dans les planchers mixtes de bâtiments. Zurich, Centre suisse de la construction métallique (SZS), 1973 (publication B5).
- [3] British Standard. BS 5950: Structural use of steelwork in building. Part 4: Code of practice for design of floors with profiled steel sheeting. London, British Standards Institution, 1982.
- [4] ASCE Standard. Specifications for the design and construction of composite slabs and Commentary on specifications for the design and construction of composite slabs. New York, American Society of Civil Engineers, 1984.
- [5] Eurocode n° 4. Règles unifiées communes pour les constructions mixtes acier-béton. Luxembourg, Commission des Communautés européennes, 1985 (Rapport EUR 9886 FR).
- [6] CECM. Recommandations européennes pour le calcul des plaques nervurées. Construction Métallique, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, vol. 22, n° 3, 1985, pp. 37-96.
- [7] Crisinel M., Tsai Y.-M., Fidler M. J. Les tôles profilées. Lausanne, Ecole polytechnique fédérale, 1985 (Publication ICOM 157).
- [8] Bucheli P., Crisinel M. Poutres mixtes dans le bâtiment. Zurich, Centre suisse de la construction métallique (SZS), 1982 (Publication A3).
- [9] Crisinel M., Fidler M. J., Daniels B. J. Flexure tests on composite floors with profiled steel sheeting. Lausanne, Ecole polytechnique fédérale, 1986 (Publication ICOM 158).
- [10] Daniels B. J., Crisinel M. Essais de dalles mixtes avec tôle profilée Hi-bond 55. Lausanne, Ecole polytechnique fédérale, ICOM-Construction métallique (en préparation).
- [11] Résistance au feu des dalles mixtes avec tôles profilées. Zurich, Centre suisse de la construction métallique (SZS), 1987.
- [12] Crisinel M., Clénin D. Connecteurs pour constructions mixtes acier-béton. Ingénieurs et architectes suisses, Lausanne, vol. 111, n° 22, 1985, pp. 419-423.
- [13] Stark J. Long span composite slabs. Rapports de l'Association internationale des ponts et charpentes, Zurich, vol. 49, 1986, pp. 291-298.
- [14] Ramsden J. A. Panneaux métalliques légers pour planchers mixtes. Ingénieurs et architectes suisses, Lausanne, vol. 111, n° 3, 1985, pp. 34-38.