

VÉRIFICATION À L'ÉTAT DE SERVICE DES POUTRES MIXTES ACIER-BÉTON

POINT DE VUE SUISSE

par M. CRISINEL

1. - INTRODUCTION

L'un des types de construction les plus utilisés en charpente métallique de bâtiments est la construction mixte acier-béton. Il s'agit aussi bien des planchers mixtes, où la tôle profilée collabore avec le béton, que des poutres mixtes où le profilé métallique est lié avec la dalle en béton. Les méthodes de calcul de ces deux types de construction sont actuellement connues et réglementées [1] [2]. Toutefois, la plupart des recherches dans ce domaine ont été orientées vers le développement de méthodes de dimensionnement à la ruine, c'est-à-dire des méthodes permettant de calculer la résistance ultime des sections mixtes ou des poutres mixtes. Cependant, tous les règlements exigent une vérification à l'état de service des constructions mixtes, vérification qui consiste essentiellement à contrôler les flèches.

La limitation des déformations des poutres mixtes dues aux charges permanentes, aux charges de service, aux tassements d'appuis, aux variations de température ainsi qu'au retrait et au fluage du béton, a pour but essentiel d'éviter des dégâts au second œuvre, par exemple aux cloisons (galandages) et aux revêtements de sol.

Le calcul des caractéristiques géométriques des sections mixtes permettant d'effectuer ces vérifications à l'état de service n'est pas toujours d'un abord facile et rapide pour l'ingénieur praticien. Cet article a pour but de faciliter la tâche de l'ingénieur dans la vérification à l'état de service et de montrer, au travers de mesures effectuées sur un bâtiment construit [3], quelle est la précision qu'on peut attendre du calcul des flèches de poutres mixtes.

M. Crisinel - Ingénieur dipl. EPUL/SIA, Chef de section à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), ICOM - Construction métallique.

2. - VÉRIFICATION DE LA FLÈCHE DES POUTRES MIXTES

Dans les constructions acier-béton, la plupart des dégâts constatés résultent des charges permanentes et des effets différés, dus au béton, que ces charges provoquent (évolution des déformations dans le temps). Il est donc nécessaire de calculer les flèches dues à toutes les charges et de fixer des limites supérieures de déformations qui soient différentes en fonction du type de charge. De plus, il est nécessaire, surtout pour les constructions mixtes non étayées, de fixer des limites de déformations au stade du bétonnage de la dalle, afin d'éviter des flèches permanentes néfastes et des surplus de béton non désirés.

Les charges à prendre en considération sont donc les suivantes : le poids propre, les charges de construction, les charges permanentes, les charges variables et les actions indirectes. Pour satisfaire à un bon comportement en service, il faut que chacune de ces charges et actions soit considérée et que les déformations qu'elles provoquent restent inférieures à des valeurs limites qui dépendent de l'élément supporté, de l'usage et de la destination de l'ouvrage construit. Les toitures doivent être particulièrement examinées en cas de faible pente, étant donné le risque d'accumulation des eaux pluviales. De plus, à cause des effets différés dus au béton, il est nécessaire de connaître de façon précise les différentes étapes de construction et les âges du béton correspondant à ces étapes.

Enfin, le calcul d'une flèche ne peut être abordé sans avoir une bonne connaissance du système statique réel de la poutre, de ses liaisons avec les travées adjacentes et avec les poutres qui lui sont parallèles. Il faut en particulier tenir compte de la fissuration du béton sur appui en cas de poutre mixte continue. Pour évaluer la grandeur d'une contreflèche à donner à la poutre métallique, les mêmes considérations doivent être faites.

2.1. — Flèche d'une poutre

La flèche maximale d'une poutre mixte se calcule à l'aide des formules classiques, mais en tenant compte du mode de montage, de l'âge du béton au moment de l'application des charges, de la durée d'application des charges et du retrait. La formule générale bien connue de la flèche maximale d'une poutre simple chargée uniformément est la suivante :

$$f_p = \frac{5pl^4}{384 E_a I_v} \quad [\text{mm}] ; \quad (1)$$

p : charge uniformément répartie [N/mm],

l : portée de la poutre simple [mm],

E_a : module d'élasticité de l'acier [N/mm²],

I_v : moment d'inertie de la section mixte [mm⁴].

La formule permettant de trouver la flèche maximale d'une poutre simple soumise à deux moments d'extrémité identique M est la suivante :

$$f_M = \frac{Ml^2}{8E_a I_v} \quad (2)$$

Dans le cas d'une poutre continue chargée uniformément, la flèche est donnée par la formule suivante :

$$f_p = \frac{\beta pl^4}{384 E_a I_v} \quad (3)$$

La valeur de β est donnée par l'abaque de la figure 1. En pratique, on calcule les déformations en admettant une inertie constante sur toute la longueur de la poutre. Il est toutefois possible de tenir compte de la fissuration sur appuis [2].

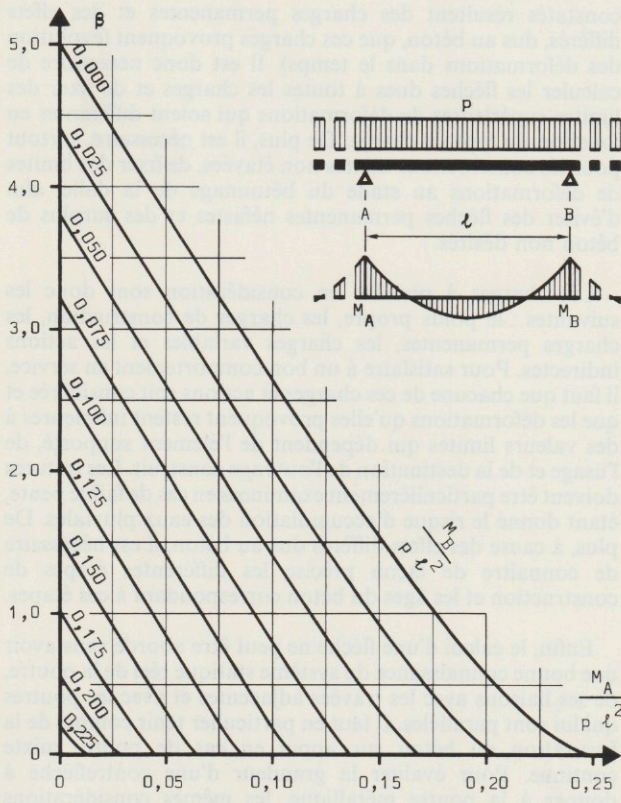


Fig. 1 — Flèche maximale d'une poutre continue.

2.2. — Flèche au montage

La charge qui se présente au moment du montage de la poutre et du bétonnage de la dalle agit sur le profilé métallique exclusivement. Il faut donc introduire dans les formules (1) et (3) la valeur :

$$I_v = I_a ; \quad (4)$$

I_a : moment d'inertie de la section du profilé métallique seul [mm⁴].

La charge à prendre en considération est de deux ordres : d'une part le poids propre de la poutre mixte (acier + béton), d'autre part les charges de construction proprement dites (coffrage, concentration de béton, ouvriers, etc.) qui n'existent plus au stade définitif. La flèche due au poids propre est permanente alors que celle due aux charges de construction dépend du moment de la prise du béton.

En cas d'étaillage, la flèche de la poutre métallique au montage devient très petite et peut être dans la plupart des cas négligée. Par contre, il faudra tenir compte de la flèche de la poutre mixte lors de l'enlèvement des étais.

2.3. — Flèche due aux charges permanentes

La flèche due aux charges permanentes est une déformation de la poutre mixte qui va évoluer au cours du temps, à cause du fluage du béton. Le fluage, qui est l'augmentation dans le temps des déformations spécifiques sous l'effet de contraintes permanentes, dépend essentiellement de l'âge du béton au moment de la mise en charge t_0 et du temps écoulé t . Il est caractérisé par un coefficient de fluage φ_t qui augmente la déformation spécifique élastique du béton :

$$\varepsilon_{k,t} = \varphi_t \varepsilon_{b,e} ; \quad (5)$$

$\varepsilon_{k,t}$: déformation spécifique de fluage du béton au temps t ,

$\varepsilon_{b,e}$: déformation spécifique élastique du béton due aux charges permanentes.

Selon le projet de norme suisse concernant les structures en béton [4], le coefficient de fluage φ_t est composé de trois termes :

$$\varphi_t = \varphi_1 \psi_{t_0} f(t) ; \quad (6)$$

φ_1 : coefficient dépendant du matériau et du climat (fig. 2 a),

ψ_{t_0} : facteur relatif à l'âge du béton t_0 lors de sa mise en charge (fig. 2 b),

$f(t)$: évolution du fluage dans le temps (fig. 2 c).

La figure 3 donne une représentation graphique de la relation σ - ε du béton sous l'effet du fluage.

Dans les sections mixtes (fig. 4), le fluage provoque une redistribution des contraintes. En effet, sous contrainte constante, le béton continuant à se déformer dans le temps, il se décharge d'une part de ses efforts sur la poutrelle métallique. Donc tout se passe comme si le fluage diminuait la rigidité de la dalle en béton. On peut alors exprimer l'évolution de cette rigidité à l'aide d'un module d'élasticité fictif du béton (méthode approximative de Fritz [7]) :

$$E_{b,t} = \frac{\sigma_{b,e}}{\varepsilon_{b,e} + \varepsilon_{k,t}} = E_{b,0} \frac{\varepsilon_{b,e}}{\varepsilon_{b,e} + \varepsilon_{k,t}} = \frac{E_{b,0}}{1 + \varphi_t} \quad (7)$$

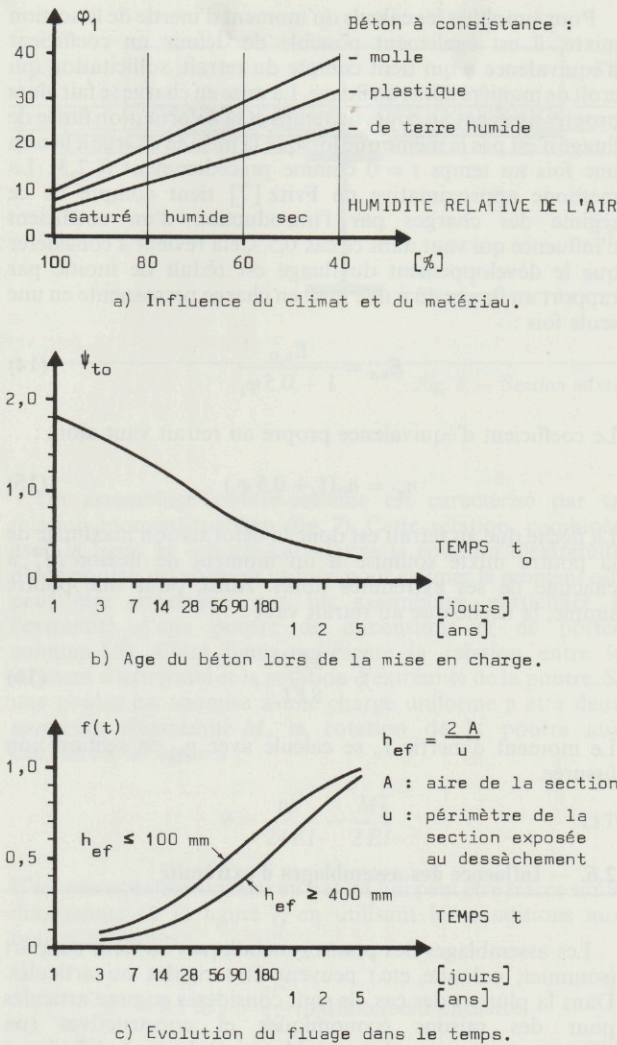


Fig. 2 — Fluage du béton.

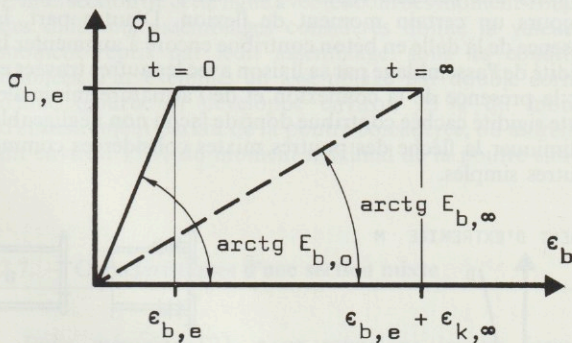


Fig. 3 — Relation σ - ϵ du béton sous l'effet du fluage.

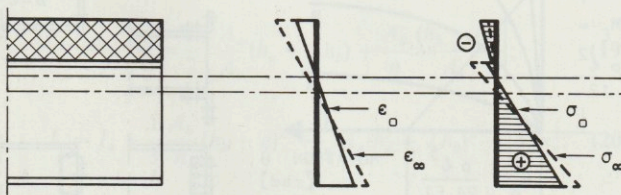


Fig. 4 — Redistribution des contraintes dues au fluage, dans une section mixte.

Le coefficient d'équivalence $n = E_a/E_b$, qui permet dans les sections mixtes de remplacer la section du béton par une section équivalente d'acier, permet aussi de tenir compte du fluage du béton :

$$n_\phi = \frac{E_a}{E_{b,t}} = \frac{E_a}{E_{b,0}} (1 + \phi_t) ; \quad (8)$$

E_a : module d'élasticité de l'acier,

$E_{b,0}$: module d'élasticité du béton pour charges de courtes durées ($E_{b,0} = 6000 \sqrt{\beta_w}$, où β_w est la résistance à la compression sur cube du béton [N/mm^2]).

Dans le calcul de la flèche due aux charges permanentes ($t = \infty$), on fera donc intervenir dans les formules (1) ou (3) la valeur I_v calculée avec $f(t) = 1$ (fig. 2 c).

En cas de poutre mixte étayée au bétonnage, la flèche permanente maximale provoquée par le retrait des étais est donnée par les relations suivantes :

un étai médian : $f_R = \frac{Rl^3}{48 EI_v} ; \quad (9)$

deux étais au tiers : $f_R = \frac{23Rl^3}{648 EI_v} . \quad (10)$

2.4. — Flèche due aux charges variables

a) Longue durée (à partir de 1 semaine)

Les charges variables de longue durée sont assimilables aux charges permanentes, à condition d'introduire dans le calcul de I_v la valeur n_ϕ donnée par l'équation (8) et dans laquelle ϕ_t est calculé avec $f(t)$ correspondant à la durée d'application de la charge.

b) Courte durée (moins de 1 semaine)

Dans ce cas, le fluage du béton n'a pas le temps d'intervenir et il faut calculer les flèches de la poutre mixte avec le module d'élasticité du béton $E_{b,0}$. Le coefficient d'équivalence n_0 est alors égal à $E_a/E_{b,0}$.

2.5. — Flèche due au retrait du béton

Le retrait est le raccourcissement du béton au cours du temps. La dalle de béton étant solidaire de la poutrelle métallique, le retrait du béton provoque dans la section mixte un état de contraintes internes. Cet état peut être déterminé en remplaçant le retrait par un jeu de forces extérieures ayant le même effet (fig. 5) : on libère par la pensée la dalle de béton de la poutrelle métallique. La dalle se retire et on lui applique un effort normal de traction N_s nécessaire pour l'allonger de la valeur du raccourcissement dû au retrait :

$$N_s = \epsilon_{s,t} E_{b,s} A_b ; \quad (11)$$

$\epsilon_{s,t}$: retrait spécifique [-],

$E_{b,s}$: module d'élasticité fictif du béton, tenant compte du retrait [N/mm^2],

A_b : section transversale de la dalle en béton [mm^2].

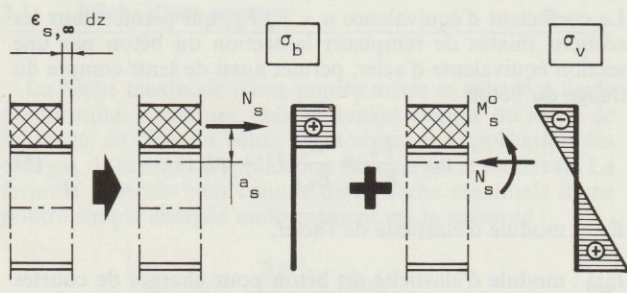
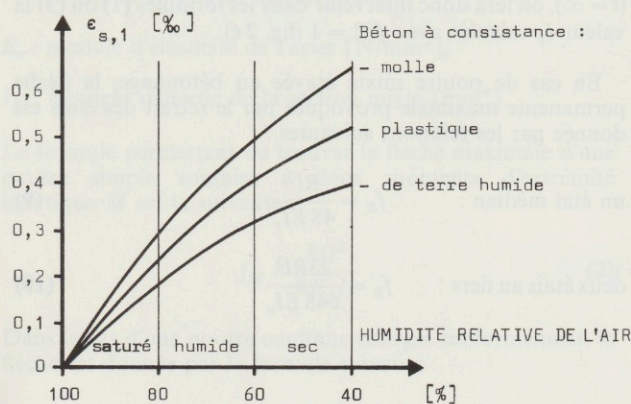
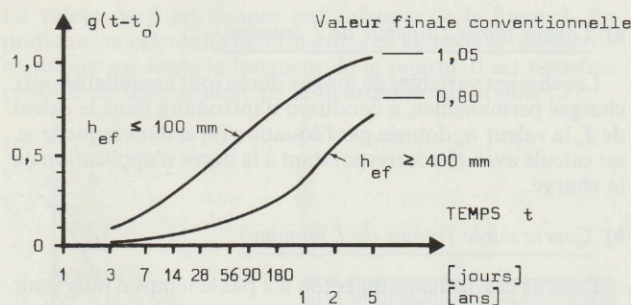


Fig. 5 - Effet du retrait sur une section mixte.



a) Influence du climat et du matériau.



b) Evolution du retrait dans le temps.

Fig. 6 - Retrait du béton.

On applique ensuite cet effort sur la section mixte, ce qui provoque un moment de flexion :

$$M_s^0 = N_s a_s ; \quad (12)$$

a_s : distance entre l'axe de gravité de la dalle en béton et l'axe de gravité de la section mixte [mm].

Le retrait spécifique s'exprime par la relation suivante [4] :

$$\varepsilon_{s,t} = \varepsilon_{s,1} g(t - t_0) ; \quad (13)$$

$\varepsilon_{s,1}$: coefficient dépendant du matériau et du climat (fig. 6a),

$g(t - t_0)$: évolution du retrait dans le temps (fig. 6b),

t : âge du béton,

t_0 : âge du béton à partir duquel le retrait doit être considéré.

Pour simplifier les calculs du moment d'inertie de la section mixte, il est également possible de définir un coefficient d'équivalence n qui tient compte du retrait, sollicitation qui croît de manière affine au fluage. La mise en charge se fait alors progressivement au cours du temps et la déformation finale de fluage n'est pas la même que lorsque la mise en charge a lieu en une fois au temps $t = 0$ comme précédemment (§ 2,3). La méthode approximative de Fritz [7] tient compte de ce régime des charges par l'introduction d'un coefficient d'influence qui vaut dans ce cas 0,5. Cela revient à considérer que le développement du fluage est réduit de moitié par rapport au fluage dû à une mise en charge permanente en une seule fois :

$$E_{b,s} = \frac{E_{b,0}}{1 + 0,5 \varphi_t} . \quad (14)$$

Le coefficient d'équivalence propre au retrait vaut alors :

$$n_{\varphi'} = n_0(1 + 0,5 \varphi_t) . \quad (15)$$

La flèche due au retrait est donc la déformation maximale de la poutre mixte soumise à un moment de flexion M_s^0 à chacune de ses extrémités libres. Ainsi, pour une poutre simple, la flèche due au retrait vaut :

$$f_s = \frac{M_s^0 l^2}{8 E I_v} . \quad (16)$$

Le moment d'inertie I_v se calcule avec $n_{\varphi'}$ en section non fissurée.

2.6. - Influence des assemblages d'extrémité

Les assemblages des poutres métalliques sur leur support (sommier, colonne, etc.) peuvent être rigides ou articulés. Dans la plupart des cas, ils sont considérés comme articulés pour des raisons économiques et constructives (un encastrement ou un joint rigide sont chers et difficiles à réaliser sur un chantier). Or, dans la réalité, ces assemblages articulés (devant satisfaire l'hypothèse de l'appui simple émise dans le calcul statique) sont en fait des assemblages présentant toujours une certaine rigidité : un nœud articulé transmet toujours un certain moment de flexion. D'autre part, la présence de la dalle en béton contribue encore à augmenter la rigidité de l'assemblage par sa liaison avec les autres travées et par la présence de la connexion et de l'armature minimale. Cette rigidité cachée contribue donc de façon non négligeable à diminuer la flèche des poutres mixtes considérées comme simples.

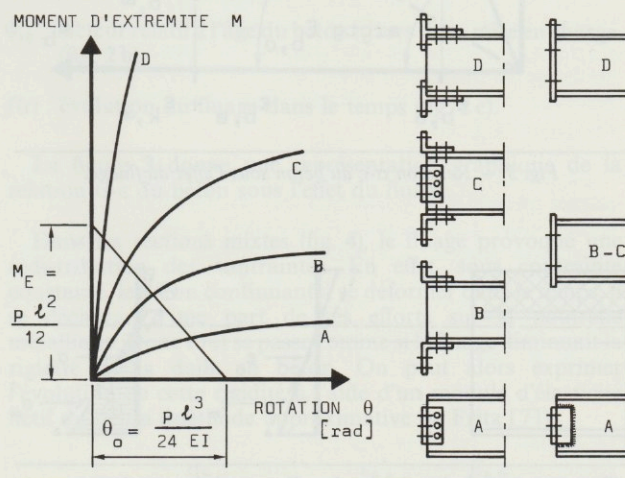


Fig. 7 - Relations moment d'extrémité-rotation.

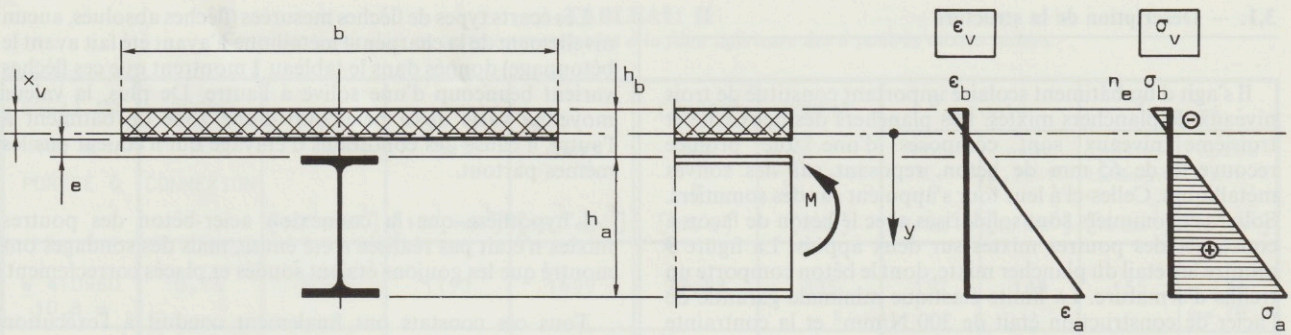


Fig. 8 – Section mixte soumise à un moment positif.

Un assemblage poutre-colonne est caractérisé par sa relation moment-rotation (fig. 7). Cette relation, combinée avec la ligne $M - \theta$ qui caractérise la rotation d'extrémité d'une poutre, est souvent utilisée pour estimer le moment qui peut être développé par un assemblage particulier à l'extrémité d'une poutre de dimensions et de portée connues [5]. Cette ligne représente la relation entre le moment d'extrémité et la rotation d'extrémité de la poutre. Si une poutre est soumise à une charge uniforme p et à deux moments d'extrémité M , la rotation de la poutre aux extrémités est égale à :

$$\theta = \frac{pl^3}{24EI} - \frac{Ml}{2EI} \quad (17)$$

C'est une équation linéaire en θ et M qui peut être tracée sur le diagramme de la figure 7, en utilisant les conditions aux limites suivantes :

$$\theta = 0 : M_E = \frac{pl^2}{12} \text{ (parfaitement encastré)} \quad (18)$$

$$M = 0 : \theta_0 = \frac{pl^3}{24EI} \text{ (poutre simple)}$$

L'intersection de cette ligne avec les courbes moment-rotation des différents assemblages considérés donne la valeur du moment repris par ledit assemblage, sous les conditions données. Par exemple, un assemblage par double cornière d'âme (courbe A) développe environ 25 % du moment d'encastrement parfait de la poutre considérée, ou autrement dit environ 15 % du moment maximal de la poutre simple.

2.7. – Caractéristiques d'une section mixte

Pour mémoire [2], nous rappelons ici les formules permettant de trouver la position de l'axe neutre et le moment d'inertie d'une section mixte soumise à un moment de flexion positif, le béton étant considéré comme non fissuré, hypothèse souvent admise pour le calcul des flèches (fig. 8) :

$$x_v = \frac{1}{2} \left[\frac{A_a}{A_v} (h_a + 2h_b) + \frac{A_b}{n} \frac{(h_b - e)}{A_v} \right]; \quad (19)$$

$$I_v = I_a + \frac{1}{3} \frac{A_b}{n} (h_b - e)^2 + \frac{1}{4} A_a (h_a + 2h_b)^2 - A_v x_v^2; \quad (20)$$

A_a : aire de la section du profilé,

A_v : aire de la section mixte ($A_v = A_a + A_b/n$),

A_b : aire de la section de béton ($A_b = b[h_b - e]$),

n : coefficient d'équivalence (voir plus haut),

b : largeur de participation de la dalle ($b = l/3 \leq s$, où l est la portée de la poutre simple et s l'écartement des poutres).

En cas de connexion partielle, le moment d'inertie peut être estimé à l'aide de la formule approximative suivante :

$$I_{v,part} = I_a + \frac{N_{part}}{N_{tot}} (I_{v,tot} - I_a); \quad (21)$$

N_{part} : nombre de connecteurs en connexion partielle,

N_{tot} : nombre de connecteurs en connexion totale,

N_{part}/N_{tot} : degré de connexion.

Rappelons qu'on parle de connexion totale lorsque les connecteurs sont dimensionnés de manière à ne jamais être la cause de la ruine. Dans le cas contraire, on parle de connexion partielle. Pour cette dernière, seuls les connecteurs flexibles sont admis (ce qui est le cas des goujons à tête pour autant que leur longueur soit supérieure à quatre fois leur diamètre). Le nombre de connecteurs en connexion partielle ne doit pas être inférieur à 50 % du nombre de connecteurs correspondant à la connexion totale [1].

Le module de flexion (en Suisse : moment de résistance) en connexion partielle peut être estimé par :

$$W_{part} = W_a + \frac{N_{part}}{N_{tot}} (W_{tot} - W_a); \quad (22)$$

W_a : module de flexion de la poutre métallique,

W_{tot} : module de flexion de la poutre mixte en connexion totale

$$(W_{tot} = I_{v,tot}/[h_a + h_b - x_v]) .$$

3. – ESSAIS DE CHARGE SUR UNE STRUCTURE RÉELLE

Les essais de charge décrits ci-dessous ont été effectués sur un bâtiment au Canada [3], suite à des problèmes de comportement à l'état de service.

3.1. — Description de la structure

Il s'agit d'un bâtiment scolaire important constitué de trois niveaux de planchers mixtes. Les planchers des deuxième et troisième niveaux sont composés d'une tôle profilée recouverte de béton, reposant sur des solives métalliques. Celles-ci à leur tour s'appuient sur des sommiers. Solives et sommiers sont solidarifiés avec le béton de façon à constituer des poutres mixtes sur deux appuis. La figure 9 montre le détail du plancher mixte, dont le béton comporte un treillis d'armature. La limite élastique minimale garantie de l'acier de construction était de 300 N/mm^2 et la contrainte limite du béton utilisée dans le calcul était de 20 N/mm^2 (résistance sur cylindre).

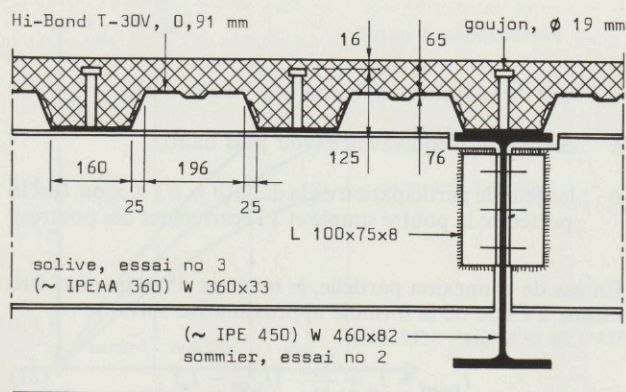


Fig. 9 — Détail du plancher mixte.

Les planchers ont été coulés en fin d'été avec du béton pompé. Les solives et les sommiers étaient étayés lors du bétonnage, étais qui ont été retirés après 7 jours. Les poutres ne comportaient pas de contreflèches. Les résultats d'essais de compression sur cylindres donnaient une résistance moyenne de $15,4 \text{ N/mm}^2$ à 7 jours et de $22,4 \text{ N/mm}^2$ à 28 jours, ce qui était supérieur à la résistance spécifiée (20 N/mm^2).

3.2. — Désordres constatés

Immédiatement après le retrait des étais, des fissures de la largeur d'un cheveu ont été constatées sur plusieurs sommiers. Jusqu'à ce que le béton ait atteint l'âge de 90 jours, les fissures se sont ouvertes plus largement et les flèches des solives ont été considérées comme excessives. Ces constatations ont conduit à effectuer une campagne de mesure par une entreprise spécialisée indépendante, mesures effectuées par nivellement. L'âge du béton, lors des mesures rapportées dans le tableau I, était de 187 jours. A ce moment-là, les fissures dans le béton sur les sommiers avaient une ouverture variant de 2 à 3 mm et atteignant même 5 mm dans certains endroits.

TABLEAU I
Flèches mesurées des solives mixtes sous l'effet du poids propre
($W 360 \times 33$, $l = 9,0 \text{ m}$, $b = 3,0 \text{ m}$).

EMPLACEMENT	NOMBRE DE SOLIVES	FLECHE MOYENNE [mm]	ECART TYPE [mm]
1er étage ouest	29	27,7	4,4
1er étage est	24	11,2	10,6
2e étage ouest	18	22,4	4,1
2e étage est	15	20,4	2,6

Les écarts types de flèches mesurées (flèches absolues, aucun nivellement de la charpente métallique n'ayant été fait avant le bétonnage) donnés dans le tableau I montrent que ces flèches varient beaucoup d'une solive à l'autre. De plus, la valeur moyenne varie aussi beaucoup d'une zone de bâtiment à l'autre, à cause des conditions d'étaillage qui n'étaient pas les mêmes partout.

L'hypothèse que la connexion acier-béton des poutres mixtes n'était pas réalisée a été émise, mais des sondages ont montré que les goudjons étaient soudés et placés correctement.

Tous ces constats ont finalement conduit à l'exécution d'essais de charge ayant pour but de confirmer que les poutres mixtes se comportaient normalement.

3.3. — Essais de charge

Deux solives et un sommier ont été soumis à des essais de charge. L'essai n° 1 était effectué sur une solive $W 410 \times 60$ ($\approx \text{IPE } 400$) de $10,8 \text{ m}$ de portée avec une dalle de participation de $2,17 \text{ m}$ de largeur (écartement des solives). La liaison acier-béton était réalisée par 34 goudjons de 19 mm de diamètre et de 125 mm de longueur, espacés de façon uniforme. La solive était appuyée sur une colonne à une extrémité, sur un sommier à l'autre extrémité, par simple assemblage par cornières d'âme. Elle était située dans une zone prévue pour la bibliothèque (charge utile : $7,2 \text{ kN/m}^2$).

L'essai n° 2 concernait un sommier $W 460 \times 82$ ($\approx \text{IPE } 450$) de $9,3 \text{ m}$ de portée, supportant de chaque côté deux solives de 9 m de portée. Les points d'appuis des solives étaient situés au tiers de la portée du sommier. Au total, 48 goudjons de 19 mm de diamètre étaient disposés sur le sommier, 21 d'entre eux étaient répartis uniformément dans chaque tiers d'extrémité et 6 dans le tiers central. Les appuis du sommier sur les colonnes à chaque extrémité étaient constitués d'un simple assemblage par cornières d'âme. Cette poutre particulière, située dans une salle de classe (charge utile : $2,4 \text{ kN/m}^2$), a été testée parce qu'elle comportait une large fissure longitudinale dans le béton à l'axe de la poutre.

L'essai n° 3 a été effectué sur une solive $W 360 \times 33$ ($\approx \text{IPEAA } 360$) de 9 m de portée avec une dalle de participation de 3 m (écartement des solives). La solive comportait 16 goudjons de 19 mm de diamètre, équidistants, et était appuyée sur deux sommiers $W 460 \times 82$ par des assemblages par cornières d'âme. Elle était située dans une salle de classe et était répétée un très grand nombre de fois dans le bâtiment.

La mise en charge a été effectuée à l'aide de sacs de ciment de façon à représenter une charge uniformément répartie. A chaque palier de charge, les déformations et les flèches au milieu de la portée ont été mesurées. La charge maximale, supérieure à la charge considérée dans le dimensionnement, a été maintenue pendant 24 heures ou plus. Au moment des essais de charge, le béton était âgé de 200 jours en moyenne.

3.4. — Résultats des essais de charge

a) Contraintes

Les mesures des déformations spécifiques, effectuées dans la section centrale des poutres métalliques, ont permis de déterminer les contraintes maximales, à la fibre inférieure, rapportées dans le tableau II (dernière colonne). Ce tableau donne également un résumé du calcul des contraintes aux

TABLEAU II
 Contraintes calculées et contraintes mesurées à la fibre inférieure des 3 poutres mixtes testées.

ESSAI NO PROFILE PORTEE l	DEGRE DE CONNEXION	W_a [10^3 mm ³]	W_{tot} [10^3 mm ³]	W_{part} [10^3 mm ³]	CHARGE MAX q [kN/m]	MOMENT $\frac{q l^2}{8} = M_0$ [kNm]	$\sigma_{calculé}$		$\sigma_{mesuré}$	
							avec M_0 [N/mm ²]	avec $0,75 M_0$ [N/mm ²]	instan- tanément [N/mm ²]	après x h [N/mm ²]
1 W 410x60 10,8 m	0,76	1060	1793	1699	22,98	335	197	148	155	174 $x = 70$ h
2 W 460x82 9,3 m	0,78	1609	2635	2515	19,62	212	84	63	46	47 $x = 54$ h
3 W 360x33 9,0 m	0,65	474	927	839	10,98	111	132	99	85	107 $x = 89$ h

mêmes endroits, calcul effectué selon les règles en vigueur en Suisse [2]. Ces valeurs calculées diffèrent très peu des valeurs obtenues avec les règles canadiennes [3].

La comparaison entre valeurs mesurées et valeurs calculées montre que :

- les valeurs mesurées sont toujours inférieures aux valeurs calculées en admettant une poutre simple,
- les valeurs mesurées sont très proches des valeurs calculées avec un moment d'encastrement partiel aux extrémités égal au quart du moment maximal de la poutre simple.

b) Flèches

La mesure des flèches des poutres mixtes sous des charges variables représente un élément essentiel de l'estimation de leur comportement en service. Les figures 10, 11 et 12 donnent la représentation graphique de la flèche au milieu de la travée en fonction de la charge d'essais uniformément répartie, pour les trois poutres considérées et pour différents paliers de charge. Il est intéressant de noter sur ces figures l'évolution de la flèche sous l'effet de la charge maximale maintenue constante pendant une période variant de 54 heures (essai n° 2) à 89 heures (essai n° 3). Sur ces figures

ont également été reportées les valeurs calculées (voir 3,5) en admettant les deux systèmes suivants :

- la poutre simple d'une part,
- la poutre partiellement bi-encastree par deux moments d'extrémité égaux au quart du moment maximal de la poutre simple d'autre part.

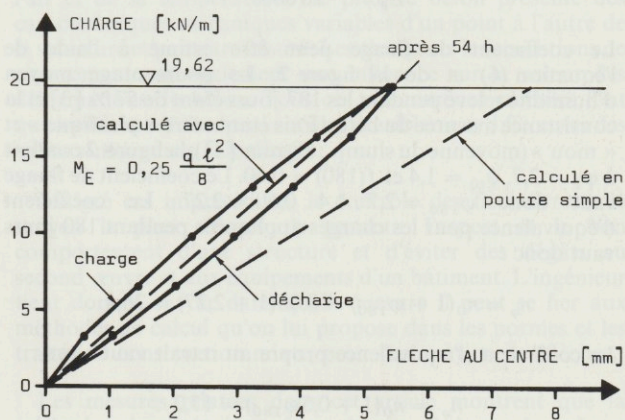


Fig. 11 - Courbes charge-flèche pour l'essai n° 2.

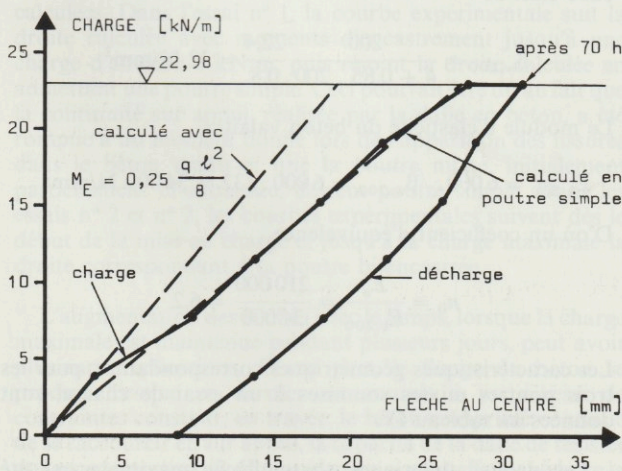


Fig. 10 - Courbes charge-flèche pour l'essai n° 1.

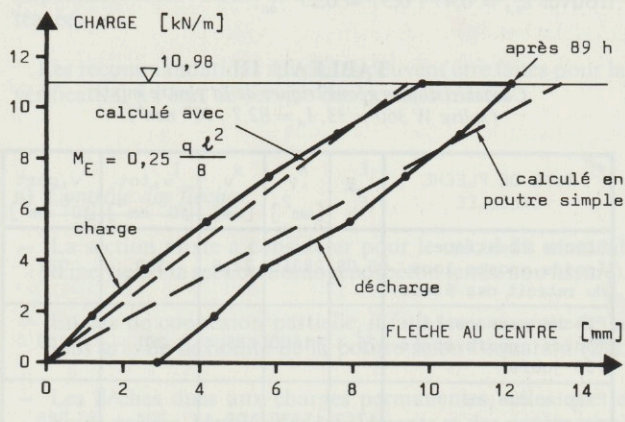


Fig. 12 - Courbes charge-flèche pour l'essai n° 3.

3.5. — Estimation théorique des flèches

Le souci principal de l'ingénieur praticien, lorsqu'il effectue la vérification à l'état de service d'une structure mixte, est d'être sûr que les flèches calculées sont proches des flèches réelles. Le contenu de ce paragraphe concerne le calcul numérique des flèches selon la théorie exposée au chapitre 2 pour la structure réelle présentée au chapitre 3.

a) Flèches dues au poids propre

Le calcul des flèches dues au poids propre a pour but l'évaluation des flèches mesurées lorsque le béton avait 187 jours (voir tableau I). Ces flèches réelles sont composées de la flèche élastique lors de l'enlèvement des étais (7 jours), de la flèche permanente due au fluage du béton entre 7 et 187 jours et de la flèche due au retrait du béton pendant la même période. Le tableau III donne un résumé des caractéristiques de la section mixte typique, nécessaires pour le calcul des flèches. Le module d'élasticité du béton à 7 jours ($\beta_w = \beta_{cyl}/0,8 = 15,3/0,8 = 19 \text{ N/mm}^2$) est égal à :

$$E_{b,7} = 6000 \sqrt{19} \approx 26000 \text{ N/mm}^2 .$$

Le coefficient d'équivalence pour les charges instantanées (enlèvement des étais) vaut donc :

$$n_0 = \frac{E_a}{E_{b,7}} = \frac{210000}{26000} = 8,08 .$$

Le coefficient de fluage peut être estimé à l'aide de l'équation (6) et de la figure 2. Le pourcentage moyen d'humidité relevé pendant les 187 jours étant de 57 % [3] et la consistance mesurée du béton frais étant entre « plastique » et « mou » (moyenne du slump : 88 mm [3]), la figure 2 conduit à $\varphi_1 = 2,7$, $\psi_{t,0} = 1,4$ et $f(180) = 0,60$. Le coefficient de fluage vaut donc $\varphi_{180} = 2,7 \cdot 1,4 \cdot 0,60 = 2,27$. Le coefficient d'équivalence pour les charges appliquées pendant 180 jours vaut donc :

$$n_\varphi = n_0(1 + \varphi_{180}) = 8,08(1 + 2,27) = 26,4 .$$

Le coefficient d'équivalence propre au retrait vaut alors :

$$n_{\varphi'} = n_0(1 + 0,5\varphi_{180}) = 17,2 .$$

Le retrait spécifique peut être estimé à l'aide de l'équation (13) et de la figure 6. Pour un pourcentage d'humidité de 57 % et un béton frais de consistance « plastique » à « mou », on trouve $\varepsilon_{s,1} = 0,47\%$. Pour une dalle mixte ($h_{ef} = 200 \text{ mm}$), $g(t - t_0)$ vaut 0,57 pour $t - t_0 = 180$ jours, ce qui permet de trouver $\varepsilon_{s,t} = 0,47 \cdot 0,57 = 0,27\%$.

TABLEAU III

Caractéristiques géométriques de la poutre mixte (solive W 360 x 33, $I_a = 82,7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$).

TYPE DE FLÈCHE CALCULÉE	$\frac{E_a}{E_b}$	A_v [mm ²]	x_v [mm]	$I_{v,tot}$ [10 ⁶ mm ⁴]	$I_{v,part}$ [10 ⁶ mm ⁴]
Flèche élastique (poids propre lors du retrait des étais)	8,08	28360	74,6	380	322
Flèche permanente (poids propre après 180 jours)	26,4	11600	135,4	301	259
Flèche due au retrait (après 180 jours)	17,2	15530	109,4	334	285

Les flèches ont été calculées en admettant que la poutre était simplement appuyée et soumise à une charge uniformément répartie. Celle-ci correspondait au poids de la poutre métallique, au poids de la tôle profilée et au poids de la dalle en béton; elle valait 7,64 kN/m. Ces flèches calculées sont données ci-dessous, compte tenu de la connexion partielle.

Flèche élastique :

$$f_{él} = \frac{5gl^4}{384EI_{v,0}} = \frac{5 \cdot 7,64 \cdot 9000^4}{384 \cdot 210000 \cdot 322 \cdot 10^6} = 9,6 \text{ mm} .$$

Flèche permanente (élastique + fluage) :

$$f_{perm} = \frac{5gl^4}{384EI_{v,\varphi}} = \frac{5 \cdot 7,64 \cdot 9000^4}{384 \cdot 210000 \cdot 259 \cdot 10^6} = 12,0 \text{ mm} .$$

Flèche due au retrait :

$$M_s = N_s a_s = \varepsilon_{s,t} \frac{E_a}{n_{\varphi'}} A_b \left(x_v - \frac{h_b - e}{2} \right) =$$

$$= 0,27 \cdot 10^{-3} \frac{210000}{17,2} 195 \cdot 10^3 \left(109,4 - \frac{65}{2} \right) =$$

$$= 49,4 \cdot 10^6 \text{ Nmm} ;$$

$$f_s = \frac{M_s l^2}{8EI_{v,\varphi'}} = \frac{49,4 \cdot 10^6 \cdot 9000^2}{8 \cdot 210000 \cdot 285 \cdot 10^6} = 8,4 \text{ mm} .$$

La flèche totale calculée de la solive mixte vaut donc :

$$f_{tot} = f_{perm} + f_s = 12,0 + 8,4 = 20,4 \text{ mm} .$$

b) Flèches dues aux charges d'essai

Les flèches des poutres mixtes sont dues, lors des essais, à des charges de courte durée et l'âge moyen du béton était de 200 jours. La résistance à la compression à t jours peut être liée à la résistance à 28 jours par la relation [3] :

$$\beta_{w,t} = \frac{t}{4 + 0,85t} \beta_{w,28} . \quad (23)$$

Ainsi à 200 jours, la résistance moyenne à la compression sur cube était de :

$$\beta_{w,200} = \frac{200}{4 + 0,85 \cdot 200} \frac{22,4}{0,8} = 32 \text{ N/mm}^2 .$$

Le module d'élasticité du béton valait :

$$E_{b,200} = 6000 \sqrt{\beta_{w,200}} = 6000 \sqrt{32} = 34000 \text{ N/mm}^2 .$$

D'où un coefficient d'équivalence

$$n_0 = \frac{E_a}{E_{b,200}} = \frac{210000}{34000} = 6,2 .$$

Les caractéristiques géométriques correspondantes, pour les trois poutres mixtes soumises à un essai de charge, sont données au tableau IV.

Les droites théoriques charge-flèche maximale ont été reportées sur les diagrammes des figures 10, 11 et 12 en traits discontinus, pour les deux systèmes statiques choisis.

TABLEAU IV

Caractéristiques géométriques des trois poutres mixtes pour le calcul des flèches lors des essais de charge.

ESSAI NO PROFILE (PROFILE)	PORTEE l [mm]	DEGRE DE CONNEXION	I_a [10^6 mm ⁴]	$I_{v,tot}$ [10^6 mm ⁴]	$I_{v,part}$ [10^6 mm ⁴]
1 W 410x60 (~ IPE 400)	10800	0,76	216	784	711
2 W 460x82 (~ IPE 450)	9300	0,78	370	1306	1197
3 W 360x33 (~ IPEAA 360)	9000	0,65	82,7	393	333

3.6. — Comparaison entre mesure et calcul

a) Flèches dues au poids propre

La méthode de calcul des flèches des poutres mixtes sous l'effet du poids propre, avec prise en compte de l'effet du fluage et du retrait, peut être évaluée en comparant les flèches totales calculées avec les flèches mesurées in situ sur les solives W 360 x 33. Bien que les mesures présentent une assez grande dispersion, la valeur calculée de 20,4 mm (voir 3,5a) correspond exactement aux moyennes mesurées reportées dans le tableau I, en particulier pour les poutres du 2^e étage.

Il ne faut pas voir dans cette bonne correspondance la preuve d'une méthode infallible. De nombreux essais ont, en effet, prouvé qu'il est très difficile d'estimer avec précision la flèche des poutres mixtes, même dans des conditions idéales de laboratoire. Les flèches dues au fluage et au retrait sont en particulier beaucoup moins précises que les flèches élastiques. Les assemblages d'extrémité des poutrelles et la continuité de la dalle conduisent en général à des flèches réelles plus petites que les flèches calculées. Toutefois, comme cet exemple le montre, la méthode théorique présentée dans cet article peut être utilisée seule pour estimer avec une bonne approximation les flèches permanentes et les flèches dues au retrait des poutres mixtes.

b) Flèches dues aux charges d'essai

La comparaison des courbes charge-flèche montre une bonne concordance entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées. Dans l'essai n° 1, la courbe expérimentale suit la droite calculée avec moments d'encastrement jusqu'à une charge d'environ 5 kN/m, puis rejoint la droite calculée en admettant une poutre simple. Ceci pourrait être dû au fait que la continuité sur appui, réalisée par la dalle en béton, a été rompue à un moment donné lors de l'apparition des fissures dans le béton tendu et que la poutre mixte, initialement partiellement bi-encastree, devient poutre simple. Dans les essais n° 2 et n° 3, les courbes expérimentales suivent dès le début de la mise en charge et jusqu'à la charge maximale la droite correspondant à la poutre bi-encastree.

L'augmentation des flèches avec le temps, lorsque la charge maximale est maintenue pendant plusieurs jours, peut avoir plusieurs explications. D'une part, le fluage du béton se produit lorsque ce dernier est soumis à un niveau de contraintes constant; en travée, le béton comprimé continue de se raccourcir et, sur appui, la capacité de la dalle de résister aux moments négatifs diminue, ce qui a pour effet de réduire la continuité et d'augmenter les flèches. D'autre part, comme cette continuité n'avait pas été prise en compte dans le

dimensionnement, des fissures perpendiculaires aux poutres métalliques, apparues dans la dalle sur appuis après l'enlèvement des étais, se sont ouvertes lors de la mise en charge et ont encore contribué à réduire la continuité.

L'essai de charge n° 2 effectué sur le sommier avait pour but de montrer que malgré la large fissure longitudinale repérée dans l'axe de la connexion, la poutre se comportait bien comme un élément mixte. Le résultat de l'essai montre que c'est effectivement le cas, puisque ni les contraintes (tableau II), ni les flèches mesurées (figure 11) ne dépassent les valeurs calculées.

Il est à relever enfin que, lors du calcul de toutes les flèches, il n'a jamais été tenu compte de la flèche due à l'effort tranchant qui vaut environ 5 % de la flèche due à la flexion.

4. — CONCLUSIONS

ET RECOMMANDATIONS PRATIQUES

La vérification à l'état de service (ou d'utilisation) d'une structure mixte, composée de poutres métalliques solidarisées avec un plancher collaborant à l'aide de connecteurs, consiste pour l'essentiel à contrôler les flèches. Le calcul des flèches des poutres mixtes présente un caractère conventionnel dû à la présence du béton. En effet, des phénomènes comme le fluage et le retrait sont difficiles à appréhender par le calcul, étant donné qu'ils dépendent fortement du temps, de l'humidité de l'air et de la température. De plus, le béton présente des caractéristiques mécaniques variables d'un point à l'autre de la structure et peut être fissuré. Les charges et les conditions de chargement ont également une influence sur la valeur des déformations du béton. Tous ces phénomènes cumulés font que les flèches réelles peuvent être sensiblement différentes des valeurs moyennes calculées.

Malgré ces imprécisions, le contrôle des flèches reste le moyen le plus efficace de garantir l'aspect et le bon comportement d'une structure et d'éviter des dégâts au second œuvre et aux équipements d'un bâtiment. L'ingénieur tient donc à savoir dans quelle mesure il peut se fier aux méthodes de calcul qu'on lui propose dans les normes et les traités de construction mixte, pour l'estimation des flèches.

Les mesures relatées dans cet article montrent que la méthode préconisée, énoncée au chapitre 2, donne des valeurs tout à fait en accord avec la réalité physique, aussi bien pour les charges permanentes que pour les charges de courte durée. Elles montrent aussi que des détails de construction comme les assemblages des poutres métalliques sur leurs supports ou l'armature de la dalle sur appui peuvent jouer un rôle important sur les valeurs de la flèche maximale au milieu de la travée.

Les recommandations suivantes peuvent être faites pour la vérification à l'état de service des poutres mixtes :

a) Contrôle des flèches

- La section mixte à considérer pour le calcul du moment d'inertie est la section homogène (béton tendu non fissuré).
- En cas de connexion partielle, il faut tenir compte de la plus grande flexibilité de la poutre selon l'équation (21).
- Les flèches dues aux charges permanentes, telles que le poids propre, le poids des revêtements et des parois, ainsi que les charges utiles de longue durée, sont à long terme

beaucoup plus gênantes que les flèches élastiques dues aux charges utiles de courte durée. Il est donc important d'estimer de façon correcte le fluage du béton (paragraphe 2,3).

- Les flèches dues au retrait du béton sont importantes dans les poutres simples. La méthode préconisée au paragraphe 2,5 donne des résultats suffisamment précis.
- Les assemblages des poutres simples sur leurs supports d'extrémité constituent un encastrement partiel de la poutre, ce qui réduit les flèches en travée. Pour un assemblage par double cornière d'âme, ce moment d'extrémité vaut environ le quart du moment maximal de la poutre simple.
- Les flèches sont fortement diminuées lorsque la poutre mixte est continue sur plusieurs travées. Toutefois, il n'est pas économique de disposer sur appui toute l'armature nécessaire à reprendre le moment négatif. La solution optimale consiste à réaliser la continuité de la poutre métallique seule et assurer la continuité de la dalle à l'aide d'un simple treillis d'armature pour lutter contre les effets du retrait et répartir la fissuration. Le calcul de la flèche maximale d'une telle poutre continue devra donc tenir compte de la variation d'inertie entre la travée (section mixte complète) et l'appui (section composée du profilé métallique et du treillis d'armature). L'ouvrage [2] donne une méthode avec abaques permettant d'effectuer ce calcul.
- Les flèches limites qu'il ne faut pas dépasser pour garantir un bon comportement à l'état de service sont données en général dans les normes nationales ou les recommandations européennes. Le projet d'Eurocode 3 [6] propose les valeurs suivantes :

Planchers

- flèche due aux charges variables et flèche différée due aux charges permanentes :
 - en général : 0,003 l
 - parois fragiles : 0,002 l ou 15 mm
- flèche totale (esthétique) : 0,004 l

Toitures plates

- flèche due aux charges variables et flèche différée due aux charges permanentes :
 - toiture inaccessible : 0,004 l
 - toiture-terrasse : 0,003 l
- flèche totale :
 - pente > 1,5 % : 0,004 l
 - pente < 1,5 % : attention!

b) Contrôle de la fissuration sur appui

Les fissures provoquées par la rotation d'extrémité des poutres mixtes peuvent être gênantes pour des raisons d'aspect ou de résistance. Dans les deux cas, elles peuvent être

réduites par une limitation de la rotation (c'est-à-dire par la création d'une certaine continuité de la poutre) ou par la mise en place d'une armature supplémentaire dans la dalle. En particulier, une large fissure à l'axe d'un sommier provoquée par la rotation des solives perpendiculaires s'appuyant sur ce sommier peut mettre en question la qualité de la connexion acier-béton de ce sommier mixte. Il est donc indispensable dans ce cas-là de disposer une armature sur appui, transversalement au sommier, pour répartir la fissuration et limiter l'ouverture des fissures et pour assurer la transmission du cisaillement longitudinal.

Du point de vue construction, il est possible de réduire la fissuration sur appui en procédant à des bétonnages par étapes. En bétonnant d'abord les parties de dalle situées en travée des solives, la rotation d'extrémité peut s'effectuer librement. On bétonne ensuite les zones de la dalle situées au-dessus des sommiers.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier M. le Professeur G. L. Kulak qui lui a mis à disposition les documents relatifs aux essais effectués au Canada. M. Kulak est professeur de structures à l'Université d'Alberta à Edmonton, Canada. Il a passé 6 mois à l'École polytechnique fédérale de Lausanne comme professeur invité, période pendant laquelle il a fait part de son expérience dans le domaine des assemblages. Sa grande disponibilité a rendu possible la réalisation du présent article.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Commission mixte AIPC-CEB-CECM-FIP « Constructions mixtes acier-béton ».** — *Projet de code modèle pour constructions mixtes.* Construction métallique, Puteaux, vol. 17, n° 1, 1980, pp. 3-99.
- [2] **Bucheli P. et Crisinel M.** — *Poutres mixtes dans le bâtiment.* Centre suisse de la construction métallique, Zurich, 1982 (publication A3).
- [3] **Montgomery C. J., Kulak G. L. and Shwartsburd G.** — *Deflections of a Composite Floor System.* Canadian Journal of Civil Engineering, Ottawa, vol. 10, 1983, pp. 192-204.
- [4] **Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA).** — *Norme SIA 162 « Structures en béton ».* Projet soumis en consultation N 5222-4, août 1984. SIA, Zurich, 1984.
- [5] *Structural Steel Design*, Second Edition. Lambert Tall, editor. The Ronald Press Company, New York, 1974.
- [6] **Commission des communautés européennes.** — *Eurocode n° 3. Règles unifiées communes pour les constructions en acier.* Projet de novembre 1983. CEE, Bruxelles, 1983.
- [7] **Fritz B.** — *Verbundträger. Berechnungsverfahren für die Brückenbaupraxis.* Springer-Verlag, Berlin, 1961.