

# Détermination du degré d'entrave des éléments de structure hybride

Autor(en): **Bernard, Olivier / Brühwiler, Eugen**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **127 (2001)**

Heft 10

PDF erstellt am: **06.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-80047>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## Détermination du degré d'entrave des éléments de structure hybride

( GÉNIE CIVIL )



De nombreux éléments de structure en béton armé sont mis en place sur des supports existants qui entravent partiellement ou totalement les déformations physico-chimiques du nouveau béton. Dans de telles structures hybrides, l'observation de fissures traversantes est fréquente durant les jours qui suivent leur décoffrage [1]<sup>1</sup>. Le présent article présente une méthode pour déterminer le degré d'entrave des déformations du nouveau béton en fonction des caractéristiques géométriques de la structure hybride, de son système statique et des matériaux utilisés. A titre d'exemple, la notion de degré d'entrave est utilisée pour évaluer le risque de fissuration au jeune âge de deux structures hybrides. La description des phénomènes à l'origine des déformations physico-chimiques du béton et de leurs influences sur le comportement à long terme des éléments de structure hybride peut être consultée dans [2].

Des éléments de structure hybride sont réalisés dans le cadre de la remise en état ou de la modification de structures existantes en béton, de la réalisation d'ouvrages mixtes acier-béton ou bois-béton ou, encore, de la construction de nouvelles structures en béton, dont la mise en œuvre nécessite plusieurs étapes de bétonnage. Dans tous les cas, les déformations induites au jeune âge par les effets thermiques et le retrait endogène du nouveau béton et, à plus long terme, par son séchage sont entravées et des fissures traversantes peuvent apparaître.

La figure 1 illustre la présence de fissures traversantes dues aux effets thermiques au jeune âge et celle de coulures dans une dalle en porte-à-faux et une bordure qui ont été bétonnées simultanément sur un mur de soutènement existant en béton armé.

La présence de ce type de fissures diminue l'étanchéité du nouvel élément de structure, la protection de ses barres d'armature contre la corrosion [3], ainsi que celle des éléments situés au-dessous de la nouvelle section et dont les éven-

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

tuelles parties métalliques ou les barres d'armature peuvent à leur tour subir une corrosion.

Dans ce contexte, le concepteur d'une structure hybride doit être en mesure d'évaluer les efforts induits dans les éléments dont les déformations sont entravées et de prévenir l'apparition des fissures traversantes aussi bien au jeune âge qu'à long terme.

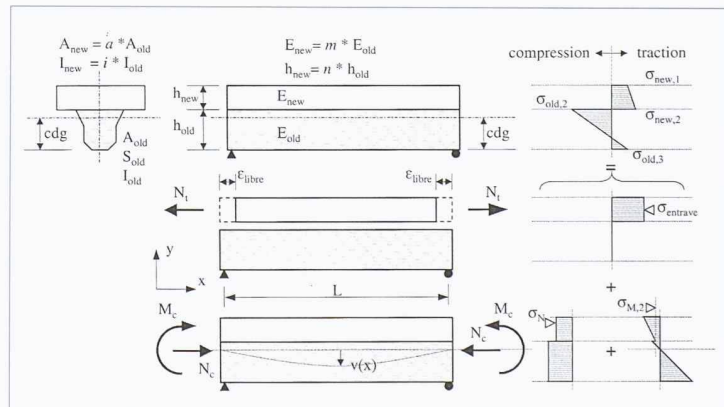
### Définition du degré d'entrave

L'entrave des déformations du nouveau béton provoque l'apparition d'autocontraintes dans les éléments hybrides. Un tel état d'autocontraintes est illustré à la figure 2, dans le cas d'un retrait empêché uniforme  $\epsilon_{libre}$  du nouveau béton.

Lors de la phase de prédimensionnement, la valeur maximale de l'autocontrainte agissant dans le nouveau béton  $\sigma_{new,2}$  peut être estimée à l'aide de la formule simplifiée de l'équation (1), où  $\mu$  représente le degré d'entrave des déformations du nouveau béton et  $E_{new}$  son module d'élasticité effectif. Selon les définitions adoptées à la figure 2, le degré d'entrave  $\mu$  correspond au rapport entre la contrainte maximale agissant dans le nouveau béton  $\sigma_{new,2}$  et la contrainte  $\sigma_{entrave}$  qui agirait au même point si l'entrave des déformations était totale. La valeur de  $\mu$  peut donc varier entre 0 et 1 selon l'ampleur de l'entrave. L'équation (1) est une formule simplifiée, car le calcul précis de l'état d'autocontraintes induit par les déformations physico-chimiques ne peut se faire que de manière itérative en tenant compte de l'évolution au cours du temps des déformations et de celle des caractéristiques viscoélastiques du béton. En effet, le comportement visqueux du béton permet de relaxer au cours du temps une partie des autocontraintes induites [2]

$$\sigma_{new,2} = \mu E_{new} \epsilon_{libre} = \mu \sigma_{entrave} \quad (1)$$

2



### Hypothèses et principe de calcul de $\mu$

Il s'agit ici d'utiliser les notions connues de mécanique des structures pour développer un moyen de calculer le degré d'entrave  $\mu$  d'un grand nombre de structures hybrides dont la nouvelle couche est soumise à un retrait  $\epsilon_{libre}$  constant sur sa hauteur (voir fig. 2).

Les hypothèses de calcul sont les suivantes:

- le comportement mécanique des deux matériaux est admis linéaire et élastique,
- le coefficient de Poisson des deux matériaux est admis nul,
- la nouvelle section est rectangulaire, celle du support peut être quelconque,
- les sections planes restent planes (hypothèse de Bernoulli),
- l'adhérence entre le nouveau béton et le support est admise parfaite.

Le principe de calcul consiste à imposer sur la structure non

Fig. 3: Détermination du degré d'entrave d'une dalle hybride isostatique

Fig. 4: Détermination du degré d'entrave d'une dalle hybride encastree-appuyee

Fig. 5: Redistribution des moments dans des structures hyperstatiques

Fig. 6: Coupe type des deux ponts

Tableau I: Proprietes des sections des deux ponts

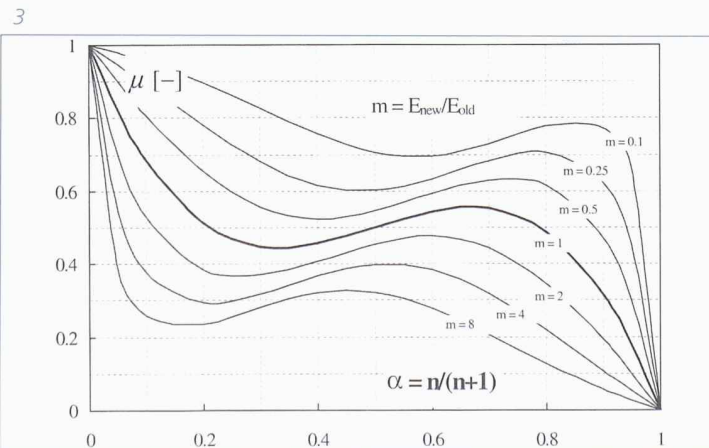
$$(2) \quad \mu = \frac{\sigma_{new,2}}{\sigma_{entrave}} = \frac{\sigma_{entrave} + \sigma_N + \sigma_{M,2}}{\sigma_{entrave}} = 1 + \mu_N + \mu_M$$

$$(3) \quad \mu_N = \frac{-ma}{ma+1}$$

$$(4) \quad \mu_M = \frac{-m \cdot a \cdot A_{old} \cdot \left[ h_{old} \left( 1 + \frac{n}{2} \right) - cdg \right] \cdot (h_{old} - cdg)}{I_{old} (m \cdot i + 1) + A_{old} \left( cdg - \frac{S_{old}}{A_{old}} \right)^2 + m \cdot a \cdot A_{old} \left[ h_{old} \left( 1 + \frac{n}{2} \right) - cdg \right]^2}$$

avec  $cdg = \frac{S_{old} + m \cdot a \cdot h_{old} \cdot A_{old} \left( 1 + \frac{n}{2} \right)}{A_{old} (m \cdot a + 1)}$

$$(5) \quad \mu = \frac{(4 \cdot m \cdot n^3 \cdot b + 3 \cdot m \cdot n^2 \cdot b + 1)}{(m^2 \cdot n^4 \cdot b^2 + 4 \cdot m \cdot n^3 \cdot b + 6 \cdot m \cdot n^2 \cdot b + 4 \cdot m \cdot n \cdot b + 1)}$$



liée une force  $N_t$  de traction au centre de gravité de la nouvelle couche pour annuler la déformation  $\epsilon_{libre}$  (fig. 2). Ensuite, afin de garantir l'équilibre, une force  $N_c$ , égale, mais de signe et de direction opposés à  $N_t$ , doit être imposée sur la structure liée.

Pour faciliter le calcul des contraintes, la force  $N_c$  placée au centre de gravité de la nouvelle couche est remplacée par une force  $N_c$  et un moment de flexion  $M_c$  agissant au centre de gravité de la section liée ( $cdg$ ).

### Expression générale du degré d'entrave valable pour une structure hybride isostatique

En détaillant le calcul de la contrainte  $\sigma_{new,2}$  de l'équation (1) à l'aide des différentes contributions illustrées à la figure 2, on obtient l'équation (2).

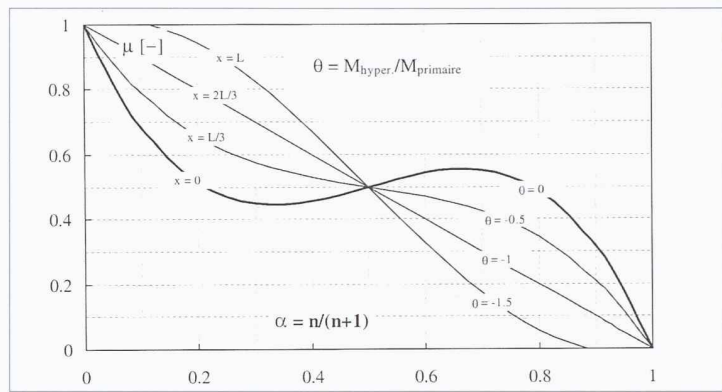
Les coefficients  $\mu_N$  et  $\mu_M$  sont différents de zéro lorsque les degrés de liberté, respectivement axiaux et flexionnels, de la structure hybride sont dégagés. Dans le cas d'une structure isostatique, cette condition est bien remplie. Par conséquent, le degré d'entrave  $\mu$  est différent de 1 et les coefficients  $\mu_N$  et  $\mu_M$  peuvent être considérés comme des «soulagements de contraintes» dus, d'une part, à l'effet axial ( $\sigma_N$ ) et, d'autre part, à l'effet flexionnel ( $\sigma_{M,2}$ ). L'expression de ces deux coefficients peut être obtenue à l'aide de notions élémentaires tirées de la mécanique des structures (voir équations (3) et (4), avec  $a$ ,  $A_{old}$ ,  $m$ ,  $h_{old}$ ,  $i$ ,  $I_{old}$ ,  $S_{old}$  et  $n$  définis à la figure 2).

### Expression pour une structure hybride isostatique à sections rectangulaires

Lorsque la section du support et celle du nouveau béton sont rectangulaires, de largeurs respectives  $b_{old}$  et  $b_{new}$  ( $b = b_{new}/b_{old}$ ), les équations (3) et (4) se simplifient et le degré d'entrave  $\mu$  peut s'exprimer selon l'équation (5).

Dans l'équation (5), le degré d'entrave ne dépend plus que des rapports  $m$ ,  $n$  et  $b$ . Pour une dalle hybride ( $b = 1$ ), l'équation (5) devient identique à celle établie par Silfwerbrand [4]. Pour de telles structures, la figure 3 donne un abaque permettant de déterminer le degré d'entrave  $\mu$  en fonction de  $m$  et  $n$ . L'abscisse  $\alpha$  de l'abaque correspond à la proportion de la hauteur du nouveau béton par rapport à la hauteur totale.

Dans le cas de la mise en place d'un surbéton sur une dalle de roulement de pont, le degré d'entrave transversale peut être calculé à l'aide de l'abaque de la figure 3. Le rapport  $n$  prend des valeurs usuelles variant entre 1/3 et 1,50 (soit  $0,25 < \alpha < 0,60$ ) et la valeur de  $m$  est relativement proche de 1. Par conséquent, le degré d'entrave  $\mu$  de la nouvelle couche de béton est compris entre 0,40 et 0,60.



**Degré d'entrave des éléments de structure hybride hyperstatique**

Lors du calcul du degré d'entrave, la valeur des coefficients  $\mu_N$  et  $\mu_M$  dépend du système statique. Si le degré de liberté associé à l'un des deux coefficients est bloqué, le coefficient correspondant est nul.

Pour une poutre hybride bi-encastree (fig. 5), les degrés de liberté axiaux et flexionnels sont bloqués. Par conséquent, les coefficients  $\mu_N$  et  $\mu_M$  valent zéro et le degré d'entrave 1 dans toute la nouvelle couche. En définitive, lorsque  $\mu$  vaut 1, la contrainte présente en tout point de cette couche ne dépend que de paramètres liés au matériau, à savoir:  $E_{new}$  et  $\epsilon_{libre}$ .

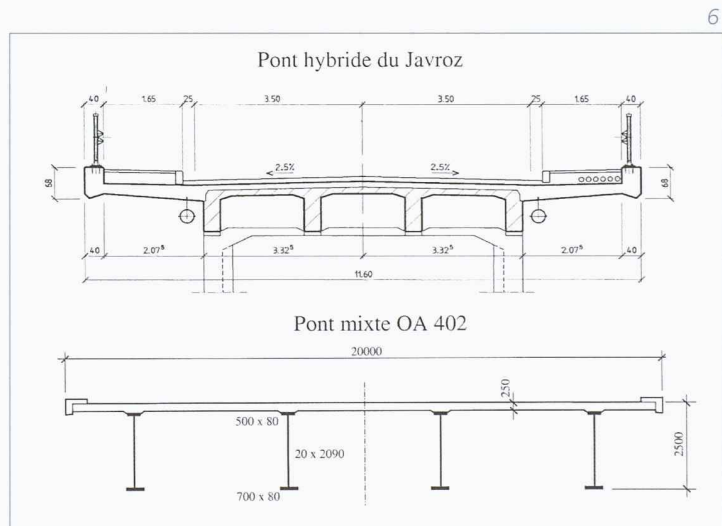
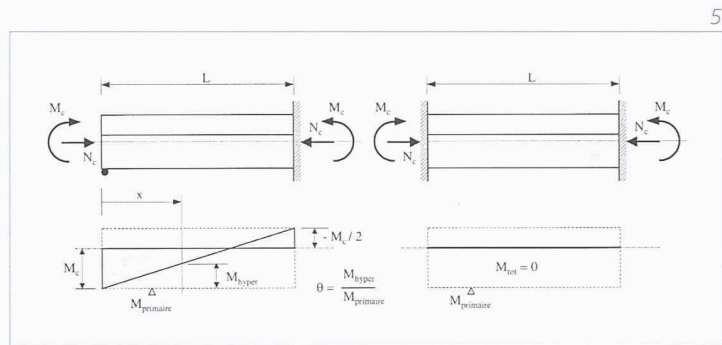
Dans le cas de la poutre encastree-appuyee illustrée à la figure 5, le degré de liberté axial est ouvert. Si la valeur de  $\mu_N$  reste donc inchangée par rapport à celle calculée pour une structure isostatique, le degré de liberté flexionnel n'est en revanche plus totalement dégage. Le degré d'entrave varie le long de la poutre pour atteindre une valeur maximale à l'encastrement. Dans le cas où  $m$  et  $b$  valent 1, le degré d'entrave  $\mu$  de la poutre encastree-appuyee peut être déterminé à l'aide de l'abaque de la figure 4 en fonction du rapport  $\theta$  entre le moment hyperstatique ( $M_{hyper}$ ) et le moment primaire ( $M_{primaire} = M_c$ ) ou de la position  $x$  le long de la poutre. Dans certaines conditions, le degré d'entrave peut être doublé à l'encastrement par l'effet hyperstatique (fig. 4 et 5).

**Exemple de calcul**

Les équations (2) à (4) sont utilisées pour calculer le degré d'entrave de deux structures: le pont hybride béton-béton du Javroz et le pont mixte acier-béton OA 402, dont les coupes types sont données à la figure 6. Dans le cas du pont du Javroz, la dalle réelle est remplacée par un rectangle de 11 600 mm de largeur et de 250 mm d'épaisseur. Les degrés d'entrave sont calculés pour un module d'élasticité moyen du nouveau béton  $E_{new}$  de 20 000 MPa dans le but d'évaluer, en fin d'exemple, la contrainte dans la nouvelle couche induite par les effets thermiques au jeune âge à la fin du cycle de température. Les propriétés des deux sections sont regroupées au tableau I.

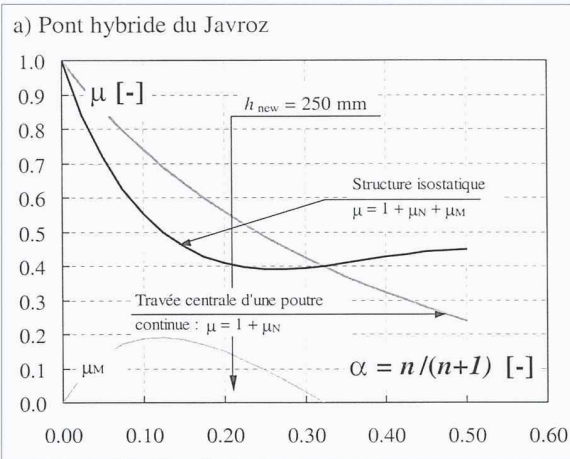
Les figures 7 a) et b) illustrent l'évolution du degré d'entrave  $\mu$  d'ouvrages ayant le même support que celui des ponts étudiés et dont la hauteur  $h_{new}$  du nouveau béton varie.

Ces figures présentent le degré d'entrave  $\mu = 1 + \mu_N + \mu_M$  dans le cas où le système statique longitudinal des ponts est isostatique, le degré d'entrave d'éventuelles travées centrales  $\mu = 1 + \mu_N$  (degré de liberté flexionnel bloqué) et la contribution  $\mu_M$  seule.

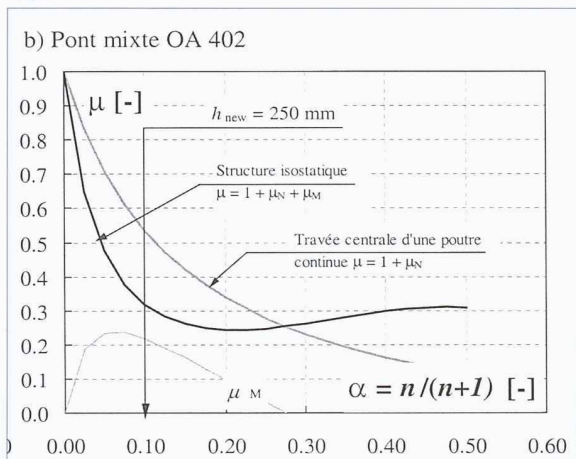


		Javroz	OA402		Javroz	OA402	
$E_{new}$	MPa	20000	20000	$m$	-	0.57	0.10
$A_{new}$	mm <sup>2</sup>	2,9 10 <sup>6</sup>	5,0 10 <sup>6</sup>	$a$	-	1.53	9.09
$h_{new}$	Mm	250	250	$n$	-	0.28	0.11
$I_{new}$	mm <sup>4</sup>	1,5 10 <sup>10</sup>	2.6 10 <sup>10</sup>	$i$	-	0.10	0.05
$E_{old}$	MPa	35000	210000	$\alpha$	-	0.21	0.10
$A_{old}$	mm <sup>2</sup>	1,9 10 <sup>6</sup>	5,5 10 <sup>5</sup>	$\beta$	-	0.65	0.11
$h_{old}$	mm	900	2250	$ma$	-	0.87	0.91
$S_{old}$	mm <sup>3</sup>	1,1 10 <sup>9</sup>	5,5 10 <sup>8</sup>	$mi$	-	0.06	0.005
$I_{old}$	mm <sup>4</sup>	1,5 10 <sup>11</sup>	5,0 10 <sup>11</sup>				
$cdg$	mm	788	1637				

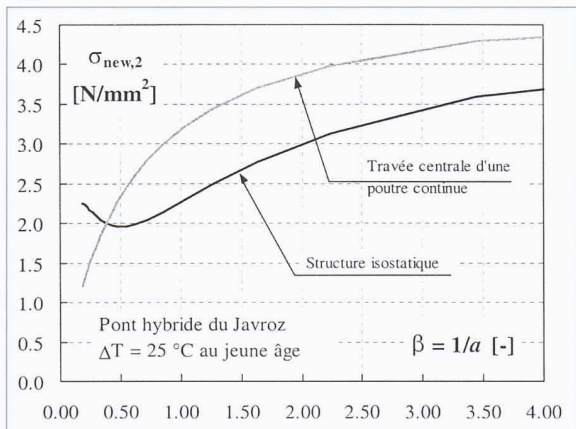
7a



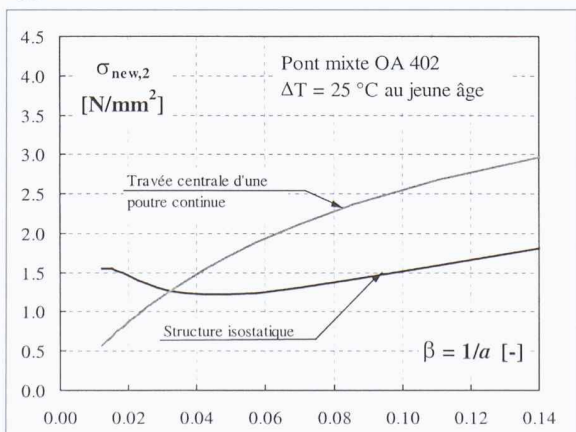
7b



8a



8b



Pour les deux ponts considérés et leur valeur respective de  $\alpha$ , on obtient:

- si les deux ponts sont des poutres simples isostatiques, le degré d'entrave du pont hybride du Javroz vaut 0,40 et celui du pont OA 402 0,32, soit 20% de moins;
- si, par contre, les effets flexionnels sont bloqués (travées centrales d'une poutre continue), les degrés d'entrave  $\mu = 1 + \mu_N$  des deux ponts sont quasiment identiques et valent 0,54.

Bien que le support métallique du pont OA 402 soit plus rigide en flexion que le support en béton du pont du Javroz, le «soulagement flexionnel»  $\mu_M$  est plus grand pour le pont mixte. Ce résultat est dû à la position de la dalle en béton par rapport à l'axe neutre de la section hybride. En effet, la section de nouveau béton est plus éloignée de l'axe neutre dans le cas du pont OA 402. Par conséquent, une faible courbure, si elle est libre de se produire, suffit à provoquer une contrainte de compression non négligeable dans la partie inférieure de la dalle (fig. 7 et 8).

Si, au lieu d'une dalle d'épaisseur de 250 mm, le support du pont du Javroz avait simplement été remis en état à l'aide d'une couche mince de nouveau béton dont l'épaisseur vaut 50 ou 70 mm (surbéton seul), le degré d'entrave d'une travée centrale  $\mu = 1 + \mu_N$  atteint respectivement 0,90 et 0,80 (fig. 7 a). Ce résultat montre bien que, dans le cas du pont du Javroz, un bétonnage simultané du surbéton, des dalles en porte-à-faux et des bordures permet de diminuer fortement le degré d'entrave.

A titre d'exemple d'utilisation du degré d'entrave, la contrainte de traction - induite par les effets thermiques au jeune âge - dans la nouvelle couche  $\sigma_{new,2}$  peut être évaluée, à la fin du cycle de température, en utilisant l'équation (6) où  $\Delta T$  représente le refroidissement dû aux effets thermiques au jeune âge de  $25^\circ\text{C}$  et où  $\alpha_T$  vaut  $10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ . L'évolution de  $\sigma_{new,2}$  en fonction du facteur de retenue  $\beta = 1/a$ , défini par Ducret dans [5] par  $\beta = A_{old}/A_{new}$ , est illustrée, pour les deux ponts, à la figure 8. Valables pour de nombreux ouvrages, les valeurs de  $\beta$  sont généralement comprises entre 0,06 et 0,14 pour un pont mixte acier-béton et entre 0,50 et 2,00 pour un pont hybride béton-béton.

Pour le pont mixte OA 402, on retrouve les résultats de Ducret [5] lorsque les effets flexionnels sont bloqués ( $\mu_M = 0$ ). Lorsque la structure est isostatique, la valeur de  $\sigma_{new,2}$  dépend toujours de  $\beta$  mais son amplitude est moindre. Pour le pont hybride du Javroz, la valeur de  $\sigma_{new,2}$  est comparativement plus élevée lorsque la structure est isostatique et elle est relativement proche de celle du pont OA 402 lorsque les effets flexionnels sont bloqués. Par conséquent,

Fig. 7: Évolution du degré d'entrave des deux ponts en fonction de  $\alpha$  (variation uniquement de  $h_{new}$ )

Fig. 8: Évolution de la contrainte  $\sigma_{new,2}$  induite dans la nouvelle couche par les effets thermiques au jeune âge

Fig. 9: Élargissement du pont sur le Javroz: l'ouvrage terminé (Photo Olivier Bernard)

ces résultats indiquent que l'apparition de fissures traversantes, dues aux effets thermiques au jeune âge, est à craindre et que des mesures doivent être prises pour éviter leur développement.

L'établissement de ces mesures devra reposer sur une évaluation des contraintes plus poussée que celle proposée dans cet article. En effet, la détermination du degré d'entrave constitue une démarche fort utile au niveau du prédimensionnement d'une structure hybride, mais qui reste simplifiée. Pour effectuer cette évaluation plus poussée, l'utilisation d'un outil de calcul numérique tel que celui proposé dans [2] est adéquate.

### Conclusion

La notion de degré d'entrave telle qu'elle a été définie dans le présent article permet donc aux ingénieurs d'évaluer de manière simple les risques de fissuration traversante d'un élément de structure hybride. En effet, les contraintes de traction agissant dans un élément entravé peuvent être calculées en multipliant l'amplitude des déformations libres par le degré d'entrave calculé. Rappelons que cette démarche s'applique aussi bien à la remise en état et à l'élargissement d'ouvrages existants, qu'à la réalisation de nouvelles structures en béton ou mixtes nécessitant plusieurs étapes de bétonnage (mur sur semelle, tranchée couverte ou tablier de pont).

$$\sigma_{new,2} = \mu E_{new} \Delta T \alpha_T \quad (6)$$

### Références

- [1] KRAUSS P.D., RAGOLLA E.A.: «Transverse cracking in newly constructed bridge decks» NCHRP Report 380, Transportation Research Board, National Research Council, United States of America, 1996
- [2] BERNARD O.: «Comportement à long terme des éléments de structure formés de bétons d'âges différents», thèse de doctorat EPFL n°2283, 2000
- [3] KELLER T.: «Dauerhaftigkeit von Stahlbetontragwerken – Transportmechanismen und Auswirkung von Rissen», Bericht IBK-ETH Zürich n°184, Birkhäuser Verlag, Basel, 1991
- [4] SILFVERBRAND J.: «Differential shrinkage in normal and high strength concrete overlays» Nordic Concrete Research, pp. 55-68, 1996
- [5] DUCRET J.-M.: «Étude du comportement réel des ponts mixtes et modélisation pour le dimensionnement», thèse de doctorat EPFL n°1738, 1997

