

ÉTAT LIMITE DE SERVICE DES POUTRES MÉTALLIQUES SOLLICITÉES EN FLEXION SIMPLE MINCEUR LIMITE DE L'ÂME

par J.-P. JASPART, R. MAQUOI et M. SKALOUD

1. — INTRODUCTION

Les poutres à âme élancée, dimensionnées selon la doctrine semi-probabiliste de la sécurité, doivent satisfaire à la fois les états limites ultimes (ou de résistance), ELU, et les états limites de service, ELS. Les ELU peuvent notamment être gouvernés par les phénomènes d'instabilité susceptibles d'affecter les parois minces et par l'extension de la plasticité dans l'élément porteur considéré.

De nombreux travaux de recherche ont été consacrés à l'évaluation réaliste de la capacité portante ultime des structures; ils ont débouché sur divers modèles de comportement fiables. Le modèle dit de la bande diagonale de traction, qui exploite pleinement la résistance postcritique de l'âme des grandes poutres à âme pleine cisailée, en constitue une illustration bien connue.

Les auteurs ont le sentiment que cette nouvelle doctrine de la sécurité pourrait laisser croire que les ELU sont déterminants et que, dès lors, la vérification des ELS pourrait ne pas recevoir toute l'attention désirable. On se borne en effet volontiers à s'assurer que, sous charges de service, une poutre à âme élancée ne prend pas une flèche excessive ou que le danger de mise en résonance de la structure peut être écarté. Cette manière de concevoir les ELS est de toute évidence trop restrictive et nullement satisfaisante parce que trop simpliste. Pour les grandes poutres à âme pleine notamment, il importe en effet que la « respiration » de l'âme sous charges de service,

qui se traduit par les déplacements transversaux au plan de ladite âme, ne génère pas un processus de fatigue sous charges variables et répétées et/ou n'engendre pas, à sa seule vue, de sentiment d'inconfort, voire d'insécurité, auprès des usagers de la structure.

Il n'est guère aisé de traduire ces critères d'état limite de service d'une manière simple et concise. En effet, l'évaluation des déplacements transversaux dont il est question, et des contraintes parasites locales qui en résulteraient, requerrait l'analyse matériellement et géométriquement non linéaire d'une structure affectée d'imperfections, tant structurales que géométriques. Il est toutefois bien connu que, jusqu'aux charges de service, le comportement d'une poutre à âme élancée destinée aux constructions civiles n'est très généralement que faiblement non linéaire; d'où l'idée, licite aux yeux des auteurs, de fonder le critère d'état limite de service considéré sur un comportement linéaire, quelque peu amendé par le biais d'un coefficient correcteur de postcriticité.

La présente étude tente de définir le domaine de minceur d'âme des poutres soumises à flexion et cisaillement, pour lequel l'état limite de service concerné serait prépondérant sur les ELU. Pour ce faire, une étude numérique paramétrique a été conduite sur deux cas qui paraissent devoir couvrir un très large éventail de situations rencontrées en pratique; on examine, d'une part, un panneau d'âme de hauteur d , non raidi longitudinalement, compris entre deux raidisseurs transversaux distants de a (fig. 1a) et, d'autre part, un panneau d'âme similaire au précédent, mais muni d'un raidisseur longitudinal placé au $1/5$ de la hauteur dans la zone comprimée de l'âme (fig. 1b).

J.-P. Jaspert — *Assistant, Service de Stabilité des constructions, Université de Liège.*

R. Maquoi — *Professeur, docteur-ingénieur, Service de Stabilité des constructions, Université de Liège.*

M. Skaloud — *Professeur, docteur Sc., Chef du Département Stabilité à l'Institut de mécanique théorique et appliquée, Académie tchécoslovaque des Sciences, Prague.*

2. — CRITÈRES DE DIMENSIONNEMENT

On a déjà laissé entendre dans l'introduction que le critère de ruine de l'âme est double; il concerne le voilement, d'une part, et l'extension de la plastification, d'autre part. Un exposé

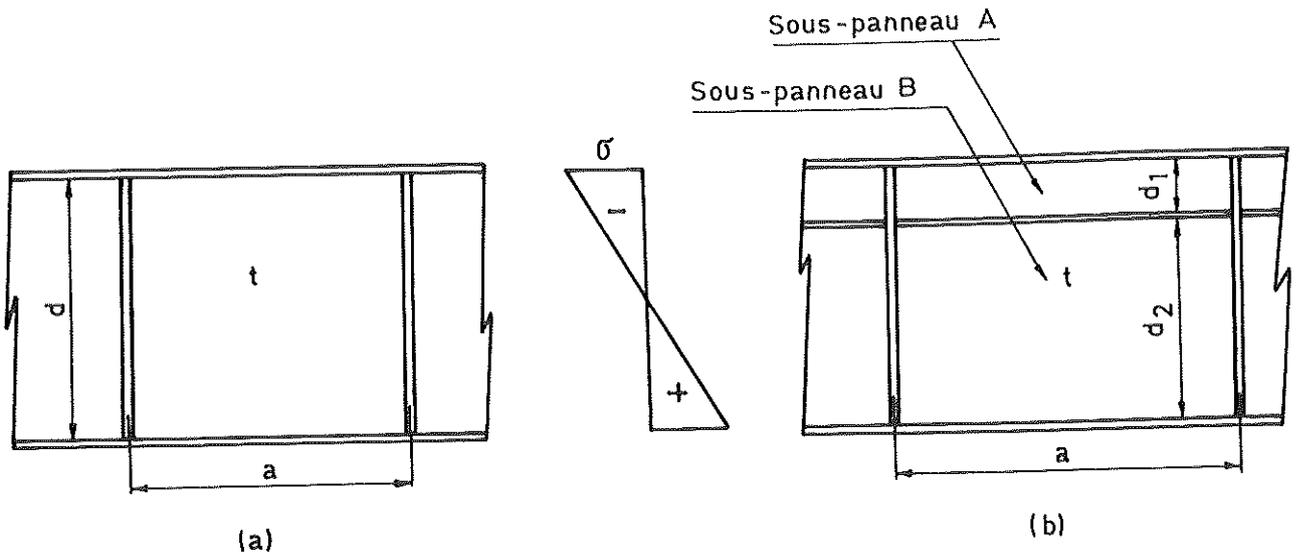


Fig. 1 - Panneau d'âme de poutre à âme pleine :
 (a) non raidi longitudinalement;
 (b) muni d'un raidisseur longitudinal au 1/5 de la hauteur.

détaillé à cet égard a fait l'objet d'une publication antérieure [1] dans cette même revue; on se bornera donc à n'en rappeler succinctement que les concepts les plus importants.

2.1. - Ruine par voilement de l'âme

La sollicitation sous charges pondérées de l'âme d'un sous-panneau de hauteur d_i et d'épaisseur t est traduite par ses composantes σ_c de compression (traction) pure, σ_b de flexion pure et τ de cisaillement (fig. 2).

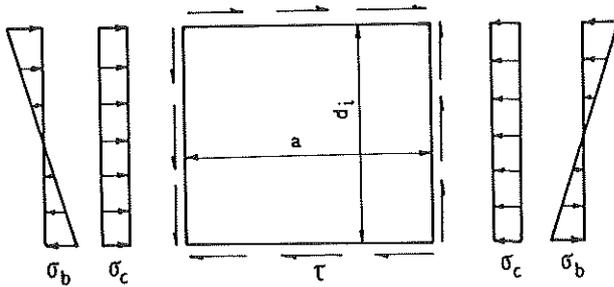


Fig. 2 - Composantes de l'état de contrainte d'un sous-panneau d'âme

La valeur ultime de chacune de ces composantes, supposée agir séparément, est donnée par S fois la limite d'élasticité f_y ; le facteur S , spécifique à la composante de contrainte considérée, dépend, en toute généralité, du rapport d'aspect $\alpha_i = a/d_i$ du sous-panneau, des conditions de restraints éventuelles sur son pourtour et de l'élanement d'âme :

$$\bar{\lambda}_{v,i} = \frac{d_i}{1,9t} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (1)$$

Lorsque les composantes agissent conjointement, la ruine d'une âme de sous-panneau est gouvernée par la loi d'interaction suivante [2] [3] :

$$\frac{\sigma_c}{S_c f_y} + \left(\frac{\sigma_b}{S_b f_y}\right)^2 + \left(\frac{\tau \sqrt{3}}{S_s f_y}\right)^2 \leq 1 \quad (2)$$

σ_c doit être négatif lorsqu'il correspond à une contrainte de traction uniforme. Par souci de simplicité et de sécurité, les expressions des facteurs de voilement, qui tiennent compte à la fois du comportement postcritique et de niveaux standards d'imperfections initiales, sont celles du seul cas «bords non restraints». Dans le domaine des valeurs d'élanement rencontrées en pratique, ces multiplicateurs s'écrivent :

$$S_c = \frac{1}{2\bar{\lambda}_{v,i}} \{ [1 + 0,56(\bar{\lambda}_{v,i} - 0,52) + \bar{\lambda}_{v,i}] - \sqrt{[1 + 0,56(\bar{\lambda}_{v,i} - 0,52) + \bar{\lambda}_{v,i}]^2 - 4\bar{\lambda}_{v,i}} \} \geq 1 \quad (3)$$

$$S_b = 1,3 - 0,12\bar{\lambda}_{v,i} \quad (4)$$

$$S_s = \beta_s \bar{\lambda}_{v,i}^\xi \geq 1 \quad (5)$$

avec β_s et ξ données ci-dessous en fonction du rapport d'aspect $\alpha_i = a/d_i$ du sous-panneau considéré :

TABLEAU I

α_i	$\leq 0,5$	$= 1$	$= 2$	≥ 3
β_s	1.344	1.032	0.964	0.952
ξ	- 0.514	- 0.515	- 0.666	- 0.988

Pour le calcul de β_s et ξ , l'interpolation linéaire entre les valeurs du tableau est suffisante.

2.2. - Ruine par plastification locale

L'extension de la plastification sous charges pondérées est gouvernée par un facteur $\eta > 1$ qui minore la contrainte de flexion dans l'expression du critère de plasticité de von Mises, écrit au point le plus sollicité du pourtour du sous-panneau considéré. Le critère est donc régi par la relation :

$$\left[\frac{\sigma_c + (\sigma_b/\eta)}{f_y} \right]^2 + \left(\frac{\tau \sqrt{3}}{f_y} \right)^2 \leq 1 \quad (6)$$

σ_c et/ou σ_b sont négatifs s'ils caractérisent des contraintes de traction. Le cas de charges variables répétées pose la question de l'adaptation plastique; cela implique que, pour ce cas, la valeur de η soit moindre que pour celui d'actions essentiellement statiques. En accord avec [1], on considère respectivement les valeurs $\eta = 1,3$ pour les charpentes et $\eta = 1,15$ pour les ponts; cette distinction autorise ainsi un degré différent d'adaptation plastique de la contrainte de flexion en raison de la plastification du bord du sous-panneau.

2,3. – État limite de service

Alors que les ELU correspondent généralement à des actions pondérées, c'est-à-dire les actions de service multipliées par un facteur de pondération γ supérieur à l'unité, les états limites de service se réfèrent aux charges de service, qui sont celles auxquelles la structure est susceptible d'être constamment exposée au cours de sa durée de vie.

Il est donc patent que les règles gouvernant les ELS reposent sur des considérations d'une tout autre nature que celles régissant les ELU. Il n'en reste pas moins utile de préciser les conditions et critères susceptibles de garantir, à tous égards, l'état limite de service de l'âme des grandes poutres en acier. Parmi les phénomènes à examiner et indépendamment de questions de flèche, on peut noter :

- a) la déformée transversale, dont une valeur excessive, surtout si elle est mise visuellement en évidence par contraste avec la rectitude des bords de semelles et des raidisseurs, peut conférer à l'observateur un sentiment de malaise psychologique;
- b) la respiration de l'âme sous chargement cyclique courant, qui peut inspirer une impression de faiblesse de la structure et dès lors d'insécurité;
- c) le phénomène de claquement (« snap through »), qui peut apparaître dans la forme voilée de l'âme sollicitée par un chargement cyclique et qui, bien que n'affectant pas les diverses fonctions de la structure, peut laisser croire que l'ouvrage est en danger de ruine.

Il en résulte que la notion d'état limite de service sera davantage tributaire d'appréciations d'ordre esthétique ou psychologique que de considérations de résistance.

Une analyse de l'état limite de service de l'âme des poutres peut raisonnablement être entreprise sur la base de la charge critique de cette âme, telle qu'elle résulte de la théorie linéaire du voilement des plaques. Ainsi, au terme d'une expérience de longue durée conduite auprès de ses étudiants, à propos de la réaction de ces derniers devant l'amplitude de la déformée transversale de l'âme voilée de diverses poutres soumises à des essais de laboratoire, K. C. Rockey a conclu [4] que le voilement de l'âme reste pour ainsi dire inobservable jusqu'à une charge de l'ordre de 1,5 fois la charge critique de voilement. Il résulte aussi d'investigations de nature théorique que, dans le cas d'âmes présentant un défaut de planéité initial, le phénomène de claquement apparaît sous des charges légèrement supérieures à la charge critique de la même âme admise parfaitement plane. Pour ces diverses raisons, les auteurs suggèrent de contrôler indirectement la déformée transversale de l'âme à partir de la relation de la théorie linéaire du voilement, traduisant l'interaction entre les valeurs moyennes des composantes $\bar{\sigma}_c$, $\bar{\sigma}_b$ et $\bar{\tau}$ sous charges de service calculées sur la base d'un modèle strictement élastique; ladite relation sera toutefois amendée, à l'intervention d'un facteur de postcriticité K , supérieur à 1, qui s'applique aux composantes de flexion et de cisaillement, les seules à autoriser une réserve de résistance postcritique notoire. Le critère de service prend donc la forme suivante :

$$\frac{\bar{\sigma}_c}{\sigma_{c,cr}^0} + \left(\frac{\bar{\sigma}_b}{K\sigma_{b,cr}^0} \right)^2 + \left(\frac{\bar{\tau}}{K\tau_{cr}^0} \right)^2 \leq 1 \tag{7}$$

$\bar{\sigma}_c$ est négatif en traction. Les valeurs critiques des composantes individuelles apparaissent au dénominateur des termes de (7); elles dépendent du rapport d'aspect $\alpha_i = a/d_i$ du sous-panneau, de l'élanement d'âme $\lambda_{v,i}$ et des conditions d'appui au pourtour et s'expriment en toute généralité par le produit d'un coefficient de voilement k et d'une contrainte de référence eulérienne σ_E . On leur substitue les valeurs critiques réduites si elles excèdent une fraction de la limite d'élasticité, prise égale à 0,8.

Les contraintes critiques doivent être calculées pour des conditions d'appui réalistes et ne pas placer inutilement en sécurité; devant l'impossibilité d'évaluer correctement le degré d'encastrement élastique du sous-panneau sur son pourtour, les auteurs suggèrent d'adopter, pour chaque coefficient de voilement k , la moyenne géométrique des valeurs k_{app} et k_{enc} , relatives respectivement au cas d'appuis simples et à celui de bords encastres, à savoir :

$$k = \sqrt{k_{app} \cdot k_{enc}} \tag{8}$$

Les valeurs de k_{app} et k_{enc} sont reprises au tableau ci-dessous en fonction du rapport d'aspect $\alpha_i = a/d_i$ du sous-panneau considéré.

TABLEAU II

Coefficient de voilement	Appuis simples : k_{app}		Encastrement : k_{enc}	
en compression k_c	4 $(\alpha_i + 1/\alpha_i)^2$	$\alpha_i \geq 1$ $\alpha_i \leq 1$	$2,03/\alpha_i^{1,5} + 7,3$ $4(3/\alpha_i^2 + 2\alpha_i^2 + 2)/3$	$\alpha_i \geq 1$ $\alpha_i \leq 1$
en flexion k_b	23,9 $15,87 + 1,87/\alpha_i^2 + 8,6\alpha_i^2$	$\alpha_i \geq 2/3$ $\alpha_i \leq 2/3$	39,6 $2/\alpha_i^2 + 42\alpha_i^2 + 21,3$	$\alpha_i \geq 0,475$ $\alpha_i \leq 0,475$
en cisaillement k_t	$5,34 + 4/\alpha_i^2$ $4 + 5,34/\alpha_i^2$	$\alpha_i \geq 1$ $\alpha_i \leq 1$	$8,98 + 5,6/\alpha_i^2$ $5,6 + 8,98/\alpha_i^2$	$\alpha_i \geq 1$ $\alpha_i \leq 1$

Les auteurs proposent d'opter pour $K = 1,1$ pour les ouvrages soumis à des charges variables et répétées — pour lesquelles le comportement en service doit rester peu ou non postcritique — et $K = 1,5$ lorsque la nature des actions est essentiellement statique, puisqu'alors seul l'argument esthétique ou psychologique est susceptible de limiter l'étendue du domaine postcritique autorisé.

Pour l'investigation numérique, il a été admis que les contraintes à la ruine et en service étaient dans le rapport de 3 à 2, ce qui correspond sensiblement à un facteur global de pondération des charges de 1,5.

2.4. — Recherche du critère déterminant

Pour chaque sous-panneau étudié, il est loisible de représenter le rapport entre la contrainte normale maximale dans le panneau à la ruine et la limite d'élasticité f_y , en fonction de la minceur d/t , et ce, pour les divers critères de dimensionnement examinés plus haut. Un diagramme peut être dressé pour une valeur déterminée du rapport τ/σ ; il comporte trois courbes, à savoir le critère d'état limite de service, le critère de ruine par plastification et le critère de ruine par voilement (fig. 3). En reportant sur un même dessin les courbes relatives à tous les sous-panneaux d'un panneau d'âme déterminé, il est aisé d'identifier le critère déterminant pour le dimensionnement, à partir de l'enveloppe inférieure des courbes précitées. La figure 4 illustre ce qui précède pour le cas d'un panneau muni d'un seul raidisseur longitudinal.

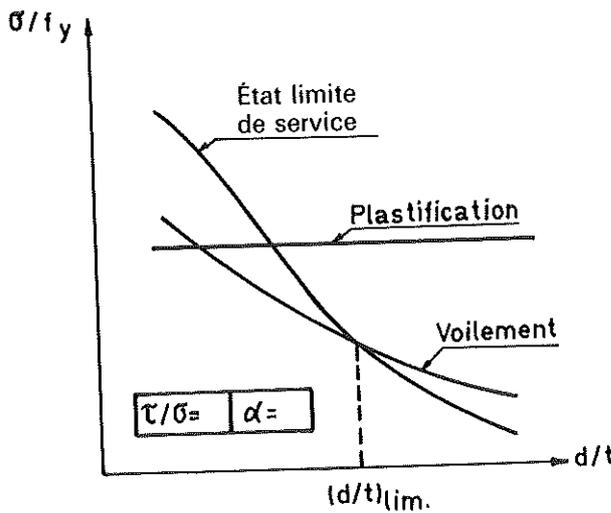


Fig. 3 — Critères de dimensionnement

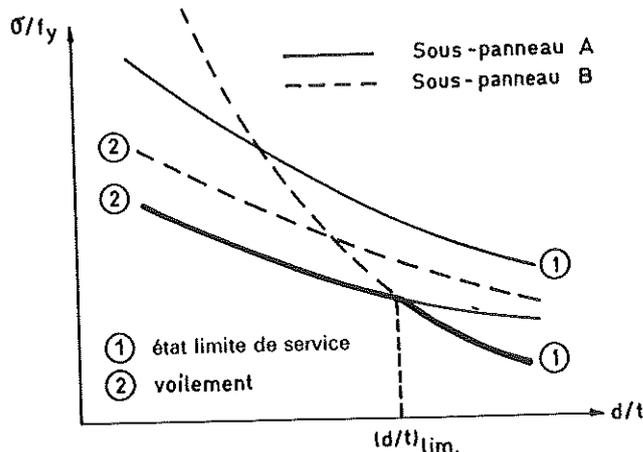


Fig. 4 — Critères déterminants; diagramme de principe pour le cas du panneau d'âme raidi longitudinalement ($\alpha = 1$, $\tau/\sigma = 0,25$, $K = 1,1$)

3. — ANALYSE PARAMÉTRIQUE

L'analyse paramétrique porte, d'une part, sur un panneau d'âme d'une poutre symétrique raidie transversalement et, d'autre part, sur cette même poutre munie d'un raidisseur longitudinal au 1/5 supérieur de sa hauteur. En toute généralité, ces poutres pourront appartenir à un bâtiment ou à un pont, de sorte qu'on aura à considérer les doublets de valeurs suivantes :

- poutre de pont : $K = 1,1$ et $\eta = 1,15$;
- poutre de bâtiment : $K = 1,5$ et $\eta = 1,3$.

La poutre étudiée étant supposée symétrique autour de son axe fort, l'âme est sollicitée en flexion et cisaillement avec $\psi = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -1$.

On examinera l'influence du rapport d'aspect $\alpha = a/d$ du panneau, à l'intérieur du domaine $0,6 \leq \alpha < 1,4$, qui couvre les configurations rencontrées le plus souvent. Quant à l'influence de l'action combinée de contraintes normales σ et de contraintes tangentielles τ , elle est étudiée au travers du rapport τ/σ , que l'on fera varier entre 0 et 4. Enfin, la minceur d/t sera comprise entre 100 et 300 pour la poutre non raidie longitudinalement et entre 100 et 500 pour la poutre munie d'un seul raidisseur longitudinal.

Les premiers résultats obtenus, relatifs aux poutres de pont, ont déjà fait l'objet d'une communication [5]. Ils sont repris ici en étant beaucoup plus largement justifiés; ils se trouvent complétés par ceux relatifs aux poutres de bâtiment.

3.1. — Panneau d'âme non raidi longitudinalement

Pour la gamme des valeurs de minceur ainsi définies, l'analyse paramétrique conduit aux observations suivantes :

- a) l'influence du facteur de plastification η est à peine significative pour $\tau/\sigma = 0$; elle devient très rapidement insignifiante dès que la valeur τ/σ augmente;
- b) le critère de ruine par plastification n'est jamais déterminant;
- c) le critère de dimensionnement déterminant est d'abord la ruine par voilement, puis l'état limite de service lorsque l'élanissement est suffisant;
- d) le critère d'état limite de service devient déterminant pour une valeur d'élanissement $(d/t)_{\text{lim}}$ dépendant du rapport τ/σ et du coefficient d'aspect $\alpha = a/d$.

La figure 5 fournit la valeur limite de minceur d'âme $(d/t)_{\text{lim}}$ au-delà de laquelle l'état limite de service prend pas sur la ruine par voilement. On observe que, pour une valeur donnée de τ/σ , la limite $(d/t)_{\text{lim}}$ augmente lorsque le rapport d'aspect α diminue; pour une valeur donnée du rapport d'aspect α , cette limite soit augmente, soit diminue lorsque la valeur τ/σ augmente, et tend assez rapidement vers une borne. Il existe une valeur du rapport d'aspect α pour laquelle la valeur limite $(d/t)_{\text{lim}}$ est pratiquement insensible à une variation de τ/σ : environ 1,2 pour la poutre de pont et 1 pour la poutre de bâtiment.

En vue de déduire des informations pratiques directement utilisables, il est licite d'idéaliser toute courbe de la figure 5 par une loi bilinéaire, choisie de manière à être sûre et simple

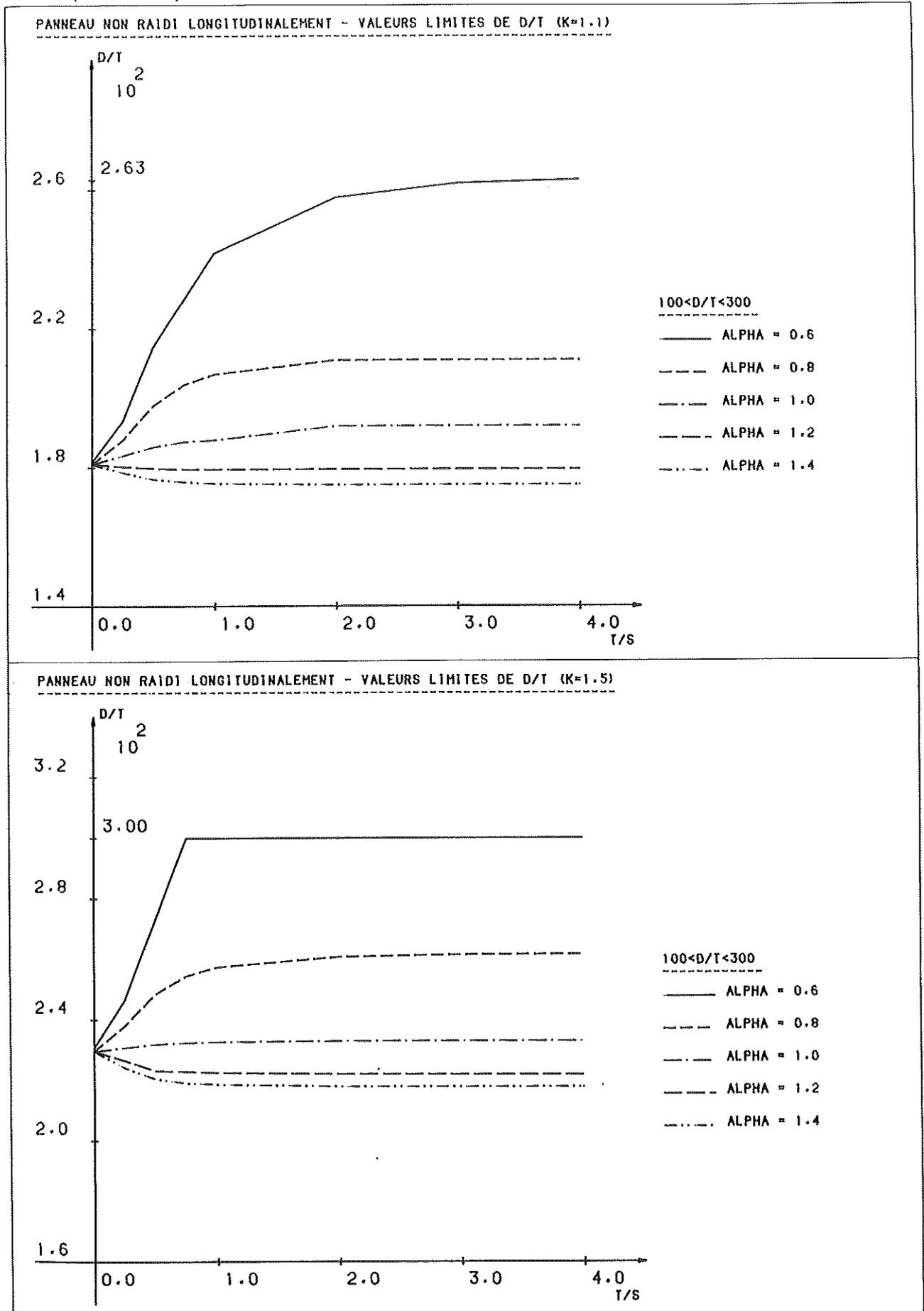


Fig. 5 - Minceur limite $d/t = f(\tau/\sigma)$
 Cas du panneau d'âme non raidi longitudinalement :
 (a) poutre de pont : $K = 1,1$;
 (b) poutre de bâtiment : $K = 1,5$.

(fig. 6), les coordonnées (γ, β) du point anguleux étant bien sûr fonction du rapport d'aspect α . En toute généralité, pour le domaine étudié de minceur ($100 \leq d/t \leq 300$), la minceur limite est donnée par :

$$(d/t)_{lim} = \text{MAX} [(d/t)_0 + F(\alpha) \frac{\tau}{\sigma}; \beta(\alpha)] \quad \text{si } F(\alpha) < 0 \quad (9)$$

$$\text{MIN} [(d/t)_0 + F(\alpha) \frac{\tau}{\sigma}; \beta(\alpha)] \quad \text{si } F(\alpha) > 0 \quad (10)$$

$F(\alpha)$ désignant la pente $[\beta(\alpha) - (d/t)_0]/\gamma(\alpha)$. Dans la relation ci-dessus, il s'agit, selon le signe de $F(\alpha)$, de retenir la valeur maximale ou minimale des deux expressions figurant entre crochets.

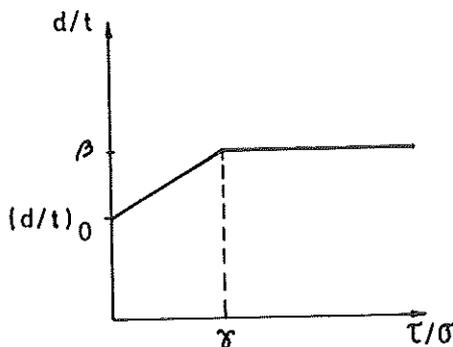


Fig. 6 — Idéalisation bilinéaire de la loi $d/t = f(\tau/\sigma)$

Les résultats de l'analyse paramétrique permettent de repérer $(d/t)_0$, de dresser les diagrammes $\beta(\alpha)$ et $\gamma(\alpha)$, d'où $F(\alpha)$, et d'ajuster au mieux une relation analytique sur les valeurs numériques obtenues pour $\beta(\alpha)$ et $F(\alpha)$. Les figures 7 et 8 permettent de se rendre compte de la qualité des ajustements auxquels les auteurs ont procédé. Il en résulte les valeurs suivantes pour le domaine exploré des valeurs du rapport d'aspect du panneau ($0,6 \leq \alpha \leq 1,4$) :

— poutre de pont :

$$(d/t)_0 = 180$$

$$\beta(\alpha) = 52\alpha + \frac{136}{\alpha} \quad (11 \text{ a-c})$$

$$F(\alpha) = 76(\alpha^2 - 3\alpha + 2,1)$$

— poutre de bâtiment :

$$(d/t)_0 = 230$$

$$\beta(\alpha) = 70\alpha + \frac{155}{\alpha} \quad (12 \text{ a-c})$$

$$F(\alpha) = 56(\alpha^2 - 3,8\alpha + 2,8)$$

3.2. — Panneau d'âme raidi longitudinalement au 1/5 de la hauteur

Il est admis que le raidisseur longitudinal possède une rigidité suffisante, lui permettant de rester rigide jusqu'à la ruine. Cette rigidité doit être au moins égale à $m\gamma^*$, où γ^* est la rigidité du raidisseur strictement rigide, au sens de la théorie linéaire du voilement et m est un coefficient de majoration dépendant du type de sollicitation et de la minceur d'âme (voir [1]). Il suffit alors d'analyser le comportement des deux sous-panneaux d'âme de hauteurs respectives $d_1 = d/5$ et $d_2 = 4d/5$.

Les valeurs numériques obtenues dans ce cas permettent de conclure comme suit :

- l'influence du facteur de plastification η se marque peu pour $\tau/\sigma = 0$ et tend à s'estomper lorsque la valeur de ce rapport augmente;
- pour le sous-panneau A ($d_1/d = 0,2$), le critère de plastification locale ne gouverne l'analyse que lorsque de faibles valeurs de τ/σ sont combinées à de petites valeurs de la minceur d_1/t ; quant au sous-panneau B ($d_2/d = 0,8$), la plastification locale n'est déterminante que si τ/σ reste inférieur à 0,5 environ;
- pour les domaines étudiés de d/t et τ/σ , le critère décisif pour le sous-panneau A est toujours le voilement local. Pour le sous-panneau B, la plastification locale et l'état limite de service sont successivement déterminantes lorsque la minceur d/t croît; pour $\tau/\sigma \leq \sim 0,5$, seuls la plastification locale et l'état limite de service sont successivement décisifs.

Dans le cas considéré, qui comporte deux sous-panneaux, le critère de dimensionnement déterminant est, comme on l'a déjà dit, défini par l'enveloppe inférieure constituée par les critères déterminants pour les deux sous-panneaux composant le panneau examiné. L'état limite de service ne sait être prépondérant que dans le panneau inférieur B ($d_1/d = 0,8$) et lorsque la minceur d'âme d/t excède une valeur limite, qui dépend du rapport de contraintes τ/σ et du rapport d'aspect $\alpha = a/d$ du panneau.

La figure 9 fournit la valeur limite de minceur d'âme d/t au-delà de laquelle l'état limite de service est plus déterminant que l'état limite ultime. Pour une valeur donnée de τ/σ , la limite $(d/t)_{lim}$ augmente lorsque le rapport d'aspect α du panneau entier diminue; pour une valeur déterminée du rapport α , cette limite diminue lorsque le rapport τ/σ augmente, pour tendre assez rapidement vers une borne.

Ici encore, par analogie avec ce qui est dit au § 3,1, on peut idéaliser chacune des courbes de la figure 9 par une loi bilinéaire et, dans le domaine étudié ($100 \leq d/t \leq 500$), exprimer la minceur limite, en fonction de α , selon

$$(d/t)_{lim} = \text{MAX} [(d/t)_0 - F(\alpha) \frac{\tau}{\sigma}; \beta(\alpha)] \quad (13)$$

$F(\alpha)$ désignant la pente $[\beta(\alpha) - (d/t)_0]/\gamma(\alpha)$.

De même, on peut ajuster des lois simples sur les valeurs numériques obtenues pour $F(\alpha)$ et $\beta(\alpha)$ ainsi que le montrent les figures 10 et 11.

En conclusion de ces diverses simplifications, on tire les valeurs suivantes, pour le domaine exploré des valeurs du coefficient d'aspect du panneau ($0,6 \leq \alpha \leq 1,4$) :

— poutre de pont :

$$(d/t)_0 = 530$$

$$\beta(\alpha) = 86\alpha + \frac{136}{\alpha} \quad (14 \text{ a-c})$$

$$F(\alpha) = 730(\alpha - 0,2) \neq 790$$

— poutre de bâtiment :

$$(d/t)_0 = 700$$

$$\beta(\alpha) = 112\alpha + \frac{165}{\alpha} \quad (15 \text{ a-c})$$

$$F(\alpha) = 950(-\alpha^2 + 2,7\alpha - 1)$$

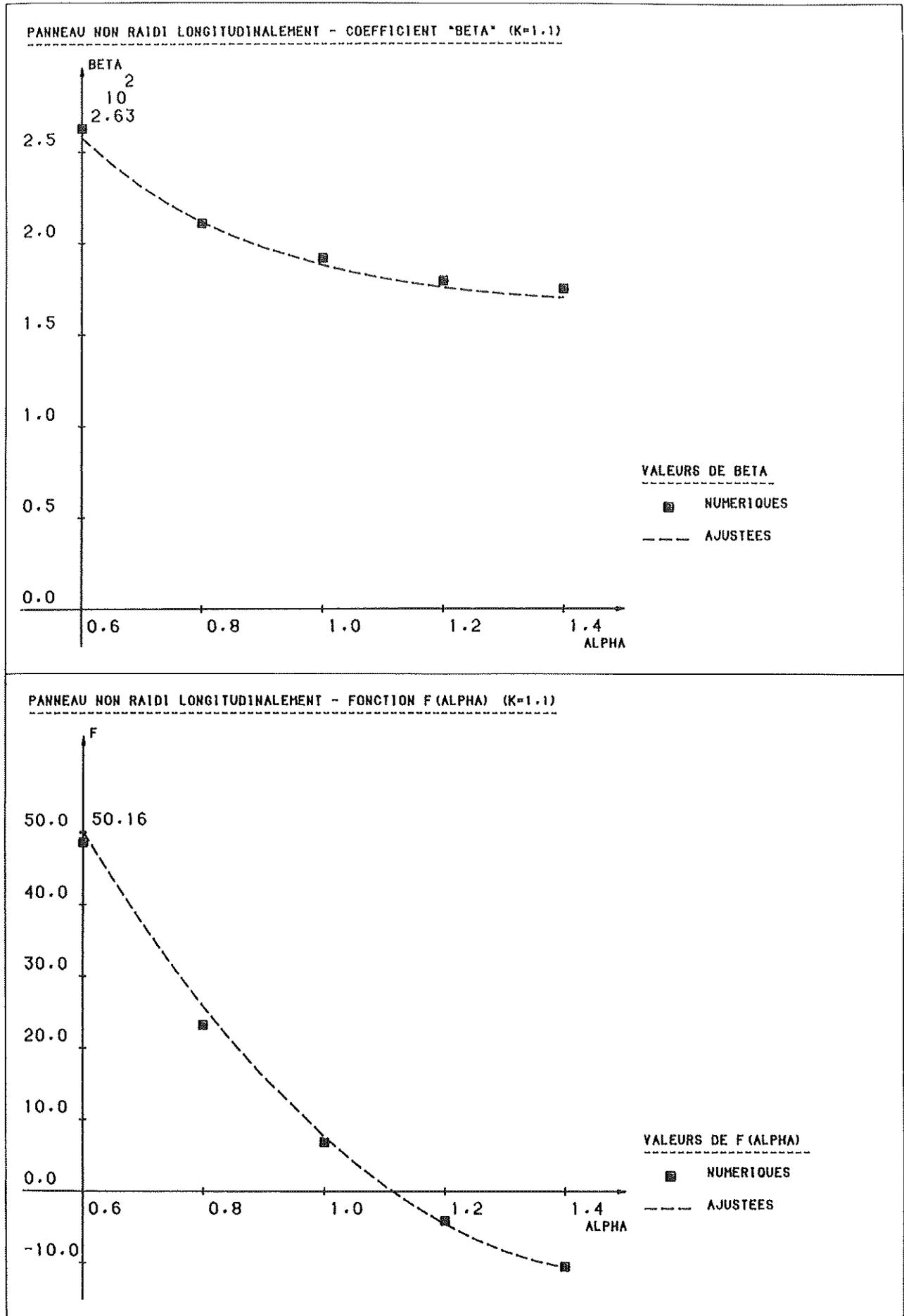
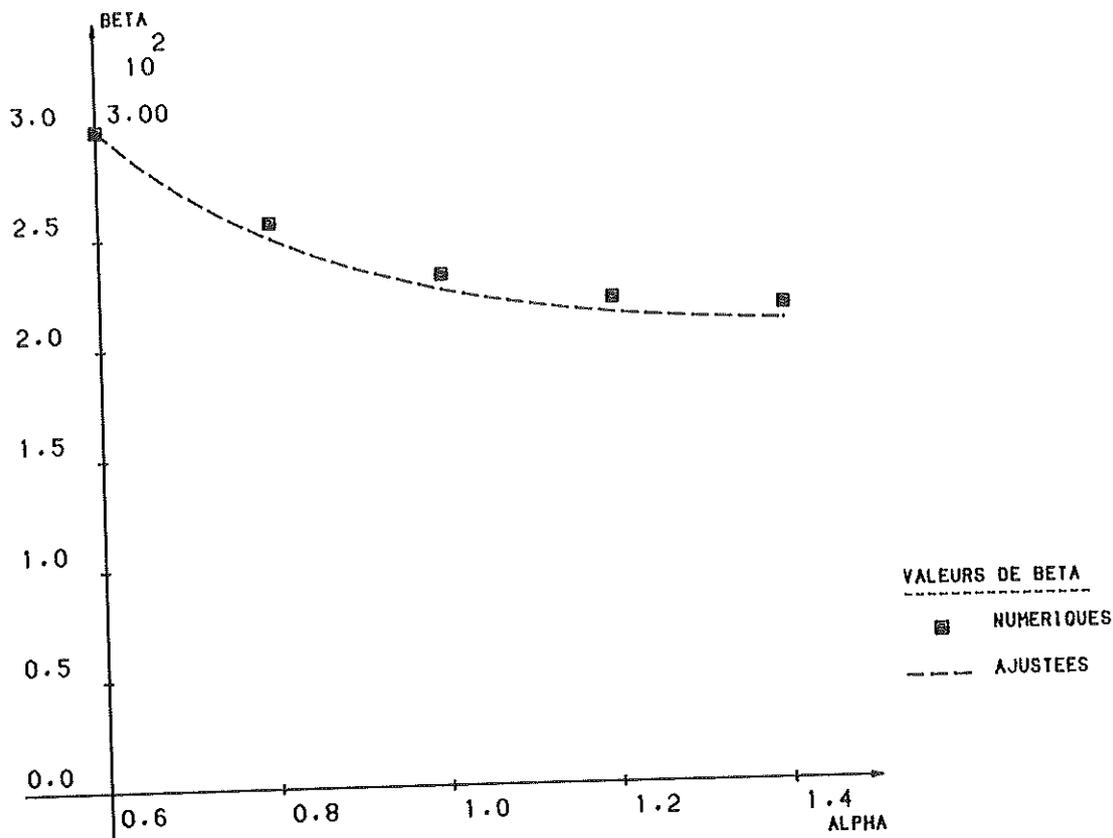


Fig. 7 - Panneau d'âme non raidi longitudinalement
Évolution de $\beta(\alpha)$ et $F(\alpha)$: cas de la poutre de pont

PANNEAU NON RAIDI LONGITUDINALEMENT - COEFFICIENT "BETA" (K=1.5)



PANNEAU NON RAIDI LONGITUDINALEMENT - FONCTION F (ALPHA) (K=1.5)

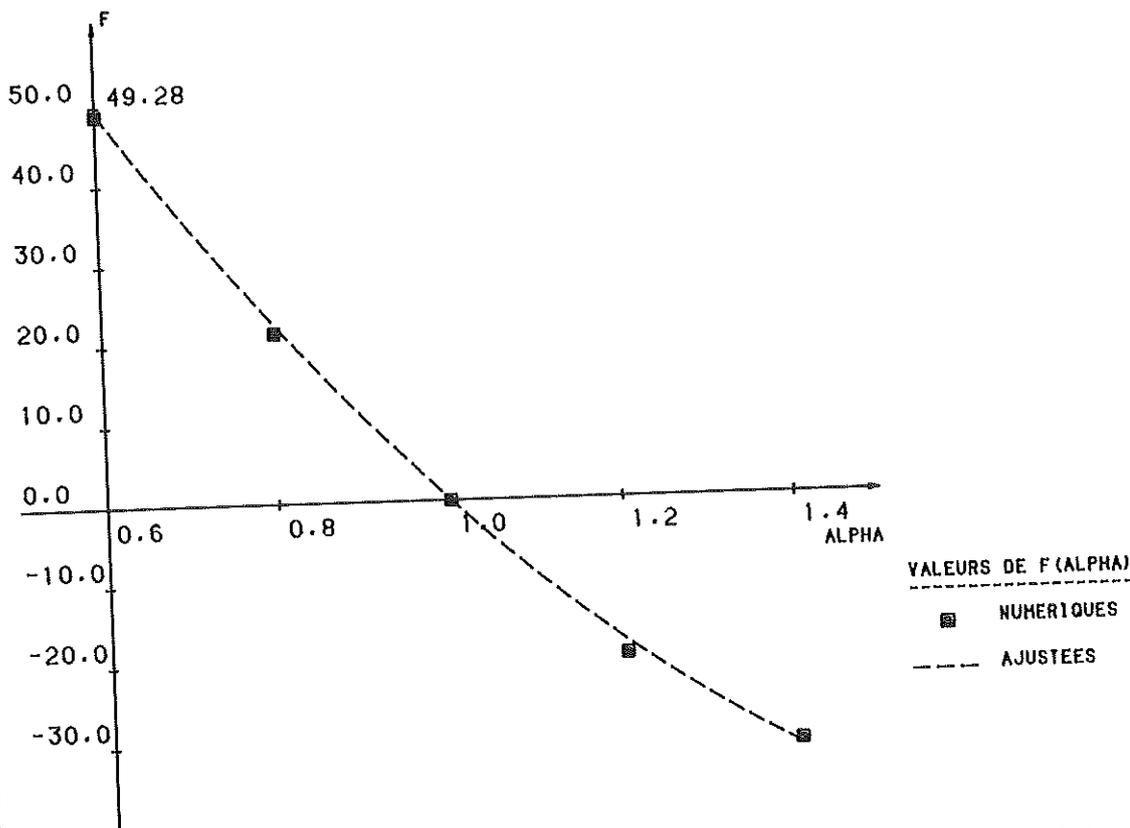


Fig. 8 - Panneau d'âme non raidi longitudinalement
Évolution de $\beta(\alpha)$ et $F(\alpha)$: cas de la poutre de bâtiment

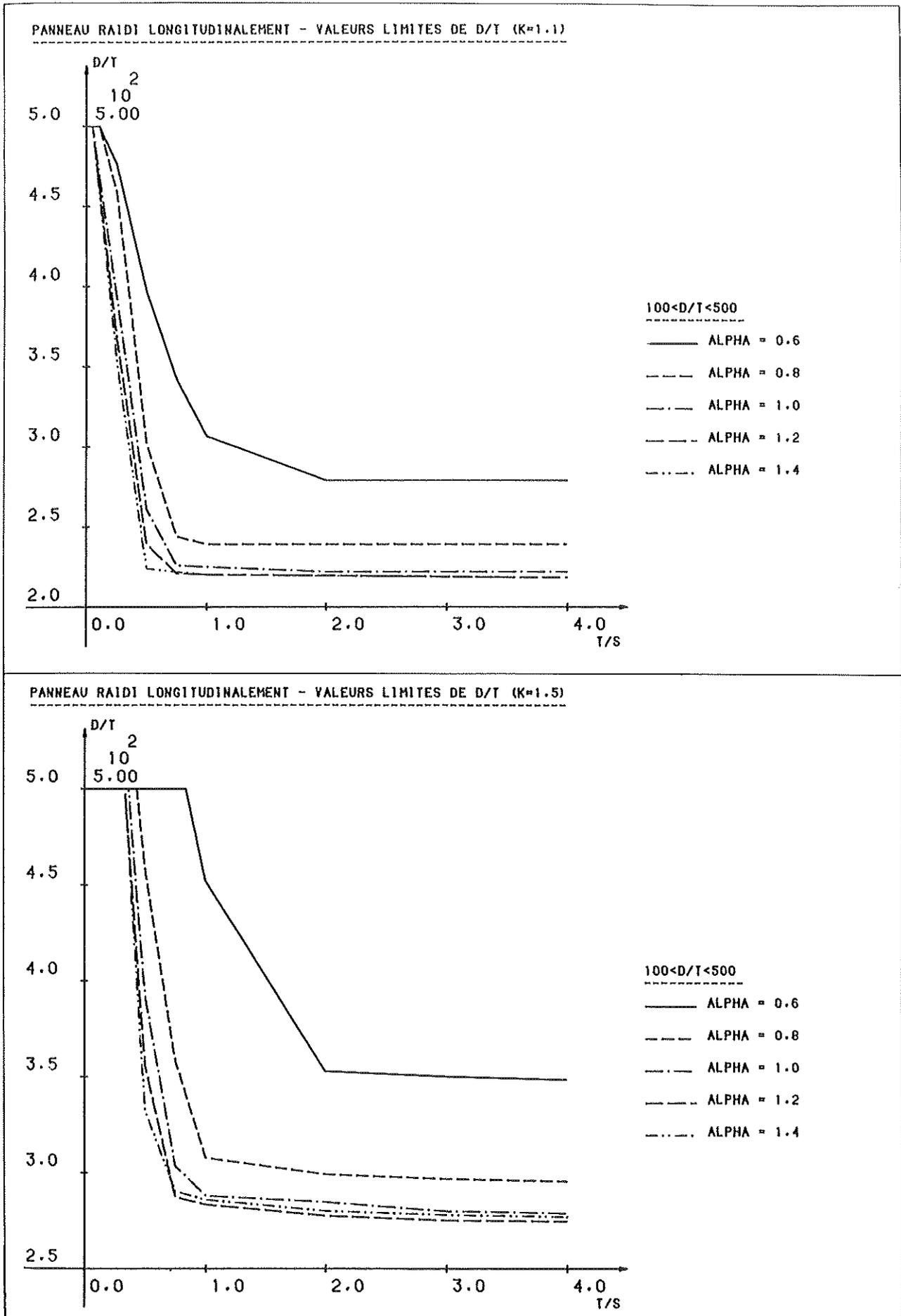


Fig. 9 - Minceur limite $d/t = f(\tau/\sigma)$ - Cas du panneau d'âme muni d'un raidisseur longitudinal au 1/5 de la hauteur :
 (a) poutre de pont : $K = 1,1$;
 (b) poutre de bâtiment : $K = 1,5$

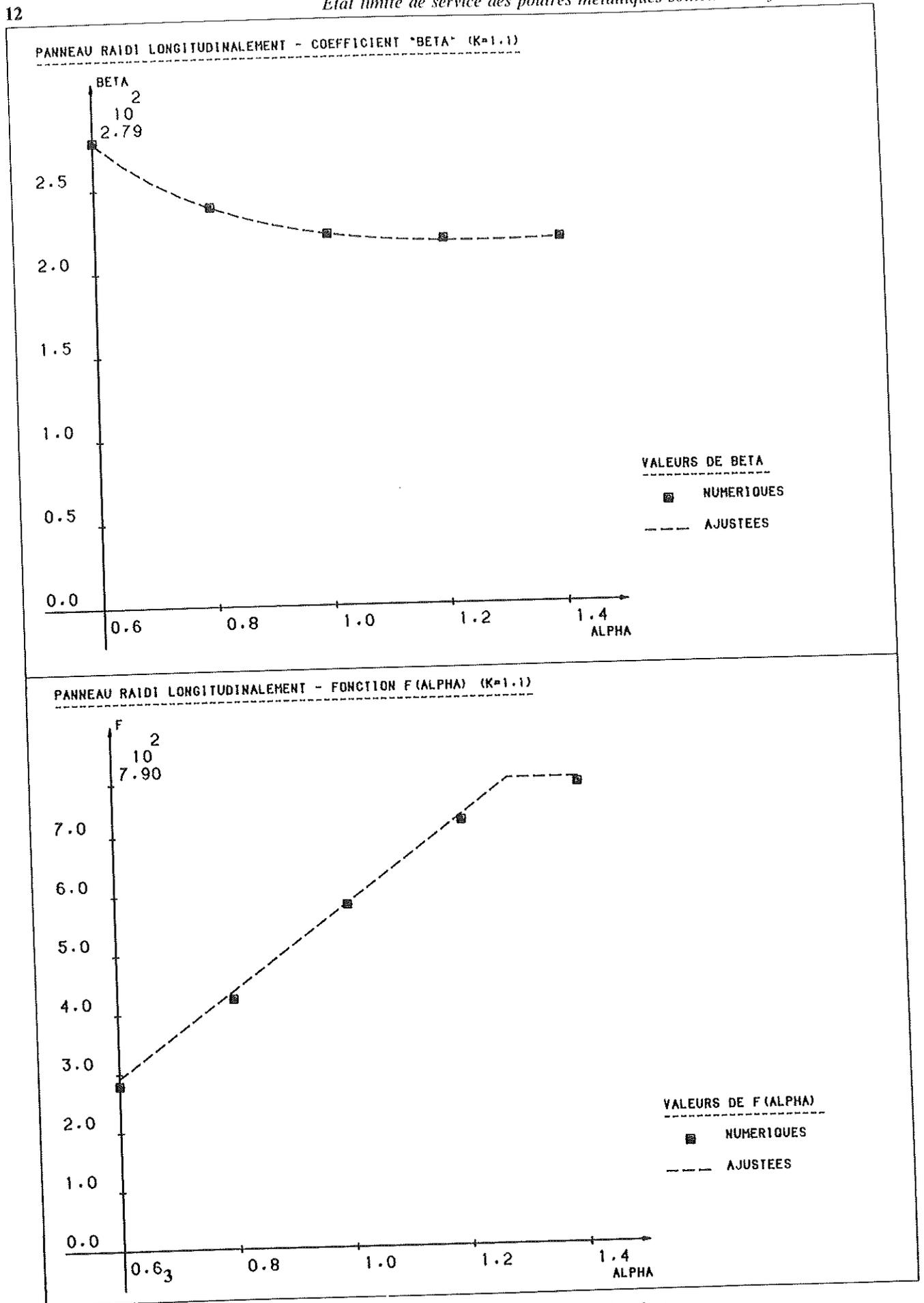


Fig. 10 - Panneau d'âme muni d'un raidisseur au 1/5 de la hauteur
 Évolution de $\beta(\alpha)$ et $F(\alpha)$: cas de la poutre de pont

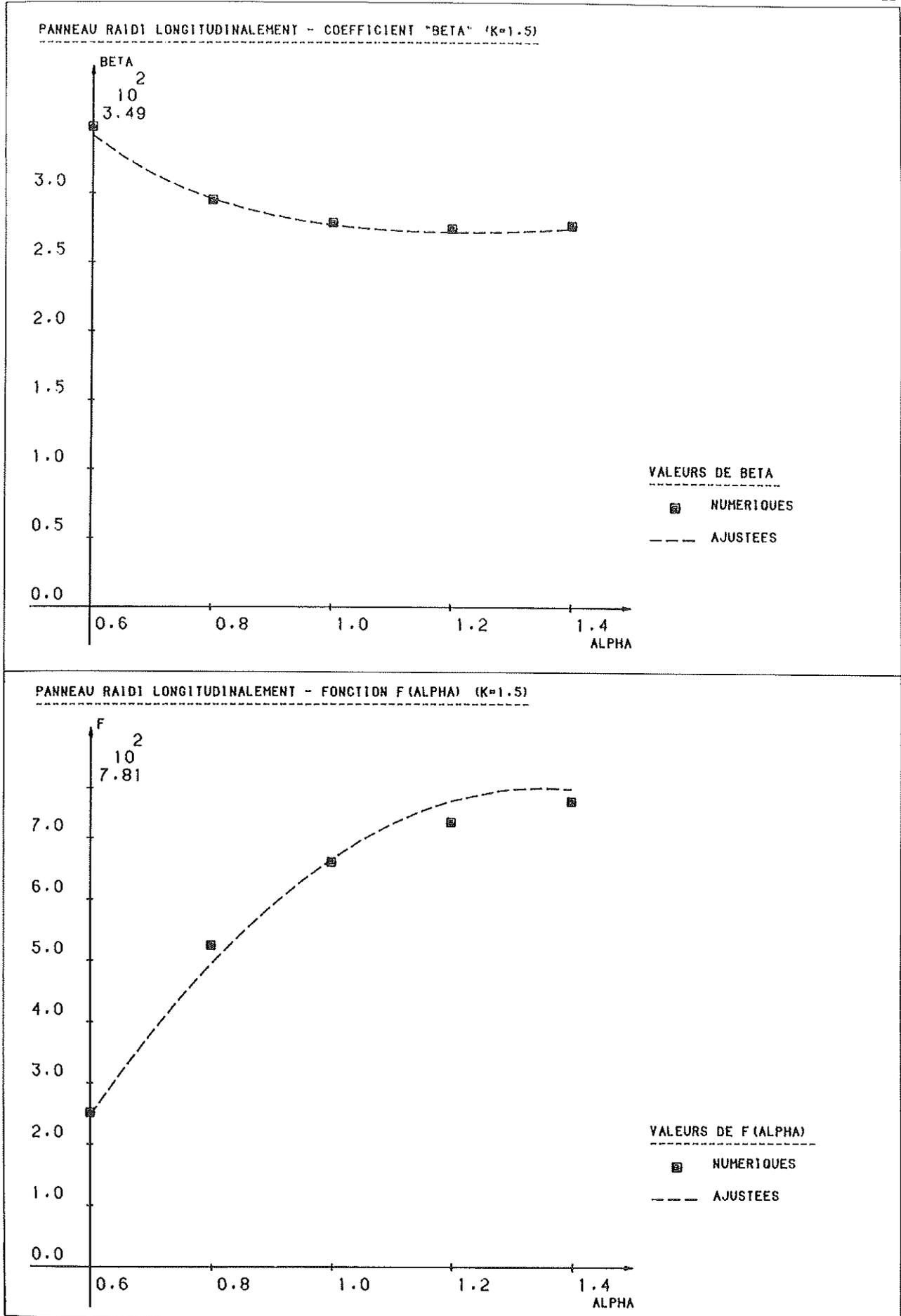


Fig. 11 - Panneau d'âme muni d'un raidisseur au 1/5 de la hauteur
Évolution de $\beta(\alpha)$ et $F(\alpha)$: cas de la poutre de bâtiment

4. - UTILISATION DES RÉSULTATS

Au chapitre précédent, on a montré que la minceur limite $(d/t)_{lim}$ peut être obtenue avec sécurité à partir de relations bilinéaires du type (9), (10) ou (13), compte tenu des expressions de $(d/t)_0$, $\beta(\alpha)$ et $F(\alpha)$. Cette valeur dépend du type de raidissage du panneau d'âme, du type de structure, du rapport d'aspect du panneau examiné et du rapport des contraintes τ/σ caractérisant le panneau.

L'application systématique des relations précitées permet de dresser les tableaux de résultats ci-après. Pour une combinaison déterminée de type de raidissage - rapport d'aspect α - rapport de contraintes τ/σ - type de struc-

ture -, la valeur $(d/t)_{lim}$ associée est donc la minceur d'âme à ne pas dépasser sous peine de voir l'état limite de service prendre le pas sur les critères de ruine et gouverner ainsi le dimensionnement.

Rappelons que les résultats obtenus concernent le cas de flexion simple, caractérisé par un rapport de contraintes normales $\psi = \sigma_{min}/\sigma_{max} = -1$. Ils devraient, pour une large gamme de cas pratiques, pouvoir servir d'informations utiles à l'ingénieur projeteur en indiquant à ce dernier, dès le stade de la conception, les proportions adéquates des dimensions de l'âme. Si une minceur excédant la valeur limite d'application devait être néanmoins envisagée, il y aurait lieu d'accroître le nombre de raidisseurs, tout en disposant ceux-ci aux emplacements optimaux.

TABLEAU III

PANNEAU NON RAIDI LONGITUDINALEMENT												
POUTRE	α	τ/σ										
		0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	4,00	
PONT	0,6	180.	193.	205.	218.	230.	255.	258.	258.	258.	258.	258.
	0,8	180.	186.	193.	199.	206.	212.	212.	212.	212.	212.	212.
	1,0	180.	182.	184.	186.	188.	188.	188.	188.	188.	188.	188.
	1,2	180.	179.	178.	177.	176.	176.	176.	176.	176.	176.	176.
	1,4	180.	177.	175.	172.	170.	170.	170.	170.	170.	170.	170.
BATIMENT	0,6	230.	242.	255.	267.	279.	300.	300.	300.	300.	300.	300.
	0,8	230.	236.	241.	247.	250.	250.	250.	250.	250.	250.	250.
	1,0	230.	230.	230.	230.	230.	230.	230.	230.	230.	230.	230.
	1,2	230.	226.	221.	217.	213.	213.	213.	213.	213.	213.	213.
	1,4	230.	222.	214.	209.	209.	209.	209.	209.	209.	209.	209.

TABLEAU IV

PANNEAU RAIDI LONGITUDINALEMENT AU 1/5												
POUTRE	α	τ/σ										
		0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	4,00	
PONT	0,6	500.	457.	384.	311.	278.	278.	278.	278.	278.	278.	278.
	0,8	500.	421.	311.	239.	239.	239.	239.	239.	239.	239.	239.
	1,0	500.	384.	238.	222.	222.	222.	222.	222.	222.	222.	222.
	1,2	500.	348.	217.	217.	217.	217.	217.	217.	217.	217.	217.
	1,4	500.	333.	218.	218.	218.	218.	218.	218.	218.	218.	218.
BATIMENT	0,6	500.	500.	500.	500.	453.	342.	342.	342.	342.	342.	342.
	0,8	500.	500.	453.	329.	296.	296.	296.	296.	296.	296.	296.
	1,0	500.	500.	367.	277.	277.	277.	277.	277.	277.	277.	277.
	1,2	500.	500.	320.	272.	272.	272.	272.	272.	272.	272.	272.
	1,4	500.	500.	310.	275.	275.	275.	275.	275.	275.	275.	275.

5. - CONCLUSIONS

Les résultats sur lesquels la présente contribution a débouché reposent, d'une part, sur la définition de critères de dimensionnement développés ailleurs [1] et, d'autre part, sur l'adoption de doublets de valeurs de K et η , permettant de différencier les types de structures - ponts et charpentes - quant à la redistribution plastique et au comportement postcritique autorisés. Le coefficient de pondération des charges à l'état limite ultime a été supposé égal à 1,5. On s'est borné à étudier le cas du panneau soumis à flexion simple ($\psi = -1$).

Il est évident que toute modification des expressions ou des valeurs adoptées lors de cette étude aurait pour effet d'altérer quelque peu les résultats. Les auteurs ont néanmoins le sentiment d'avoir pris des options réalistes et d'avoir contribué à mieux étayer les quelques rares indications trouvées dans la littérature scientifique sur le sujet. Ils osent croire que des enseignements utiles en matière de codification pourraient en être tirés; en effet, à défaut de pouvoir emporter une totale adhésion sur l'aspect strictement quantitatif des résultats obtenus, la présente étude aura montré une approche possible.

6. — REMARQUE FINALE

Bien que la résistance en fatigue soit évaluée sous charges de service, ou sous des charges proches de celles-ci, il n'en reste pas moins que la fatigue est un état limite ultime. Par ailleurs, il a été dit, dans l'introduction, que les déplacements transversaux générés par la « respiration » de l'âme en service étaient susceptibles d'introduire un phénomène de fatigue. La minceur de l'âme est assurément un des facteurs influençant le comportement sous charges variables et répétées et il est dès lors patent qu'en la réduisant, on limitera l'amplitude des mouvements de « respiration » de l'âme. Divers auteurs se sont déjà penchés sur cette question, mais les conclusions tirées restent à ce jour relativement fragmentaires et incomplètes.

Afin d'éviter toute équivoque, il est peut-être utile de préciser que les valeurs limites de la minceur d'âme, auxquelles la présente étude a conduit, ne couvrent nullement l'aspect « fatigue » du phénomène, mais se bornent à répondre à des considérations psychologiques et esthétiques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Jetteur Ph., Maquoi R., Massonnet Ch. et Skaloud M. — *Calcul des âmes et semelles raidies des ponts en acier*. Construction Métallique, N° 4, 1983, p. 15-27.
- [2] Horne M. R., Dowling P. J. et Ogle M. H. — *Report to steering Group on plated structures*. Committee B 116/3, British Standard Institution, London, 1976.
- [3] Harding J. E. et Dowling P. J. — *The basis of the proposed new design rules for the strength of web plates and other panels subject to complex edge loading*. Stability problems in engineering structures and components. Edited by J. H. Richards and P. Stanley, Appl. Sc. Publ. Ltd., Barking, 1979.
- [4] Rockey K. C. — *Web buckling and the design of web plates*. The Structural Engineer, n° 2, 1958, p. 310-317.
- [5] Maquoi R., Skaloud M. et Jaspert J. P. — *Serviceability limit state of the webs of steel girders*. A paraître dans Proceedings of the Regional Colloquium, *Stability of steel structures*, Budapest, 1986.