

Développements et résultats des recherches européennes sur le flambement des colonnes métalliques

Autor(en): **Frey, François**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **99 (1973)**

Heft 7

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-71650>

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.

Développements et résultats des recherches européennes sur le flambement des colonnes métalliques¹

par FRANÇOIS FREY, assistant du Professeur Ch. Massonnet à l'Université de Liège, Belgique

1. Introduction

L'organisme dont le but est de promouvoir, sur le plan européen, le progrès technique de la construction métallique (fig. 1) s'appelle la *Convention européenne de la construction métallique* (CECM); fondée à Zurich en 1955, elle a réparti le travail entre plusieurs *commissions*; la commission 8 a pour tâche d'étudier les *problèmes d'instabilité*.

CECM

- CONVENTION EUROPÉENNE DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE
- EUROPÄISCHE KONVENTION DER STAHLBAUVERBÄNDE

COMMISSION VIII: Problèmes d'instabilité
Stabilitätsfälle

Fig. 1

2. Développement des recherches

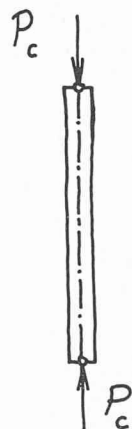
Cette commission a abordé en premier lieu le problème (fig. 2) apparemment élémentaire du flambement centré plan des colonnes. Ce problème est connu depuis Euler (1744), a fait ensuite l'objet d'études innombrables, et est traité dans tous les règlements de construction métallique: il semblait donc devoir être rapidement résolu. Son étude détaillée, entreprise par la CECM depuis quelque...

¹ Conférence donnée le 20 octobre 1972 à Zurich, dans le cadre des journées d'études organisées par le Groupe spécialisé des ponts et charpentes de la *Société suisse des ingénieurs et des architectes*, sur le thème: « Problèmes de conception et d'exécution des structures; expériences et recherches. »

douze ans, a montré juste le contraire, et a mis en lumière tous les aspects fondamentaux du calcul et dimensionnement des pièces métalliques réelles pouvant présenter des phénomènes d'instabilité. Voyons cela de plus près, rapidement:

Si on compare les courbes de flambement données par les normes de divers pays (fig. 3), on constate une dispersion étonnante; pourquoi? Parce que chaque pays adopte sa propre doctrine sur l'instabilité, tenant compte ou non

Commission 8



. Première recherche:
. Erste Forschung:

$$P_c = ?$$

Fig. 2

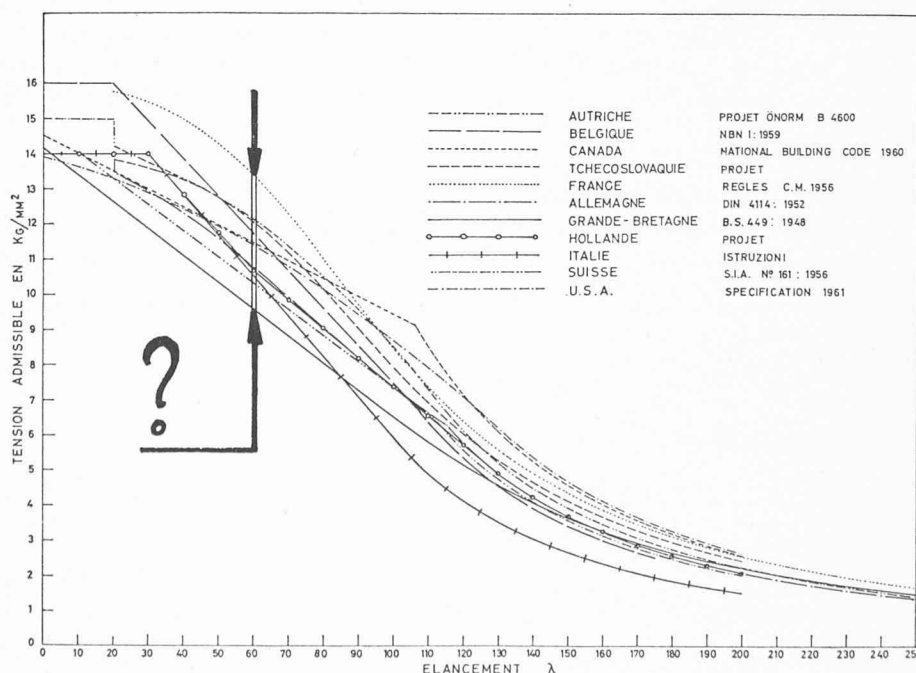


Fig. 3

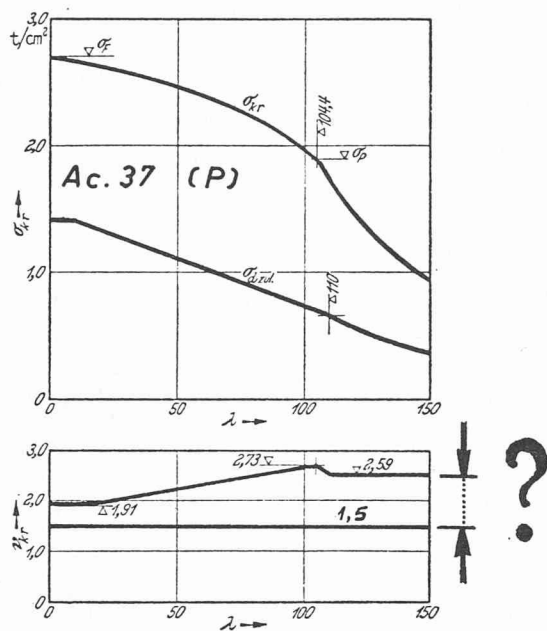


Fig. 4

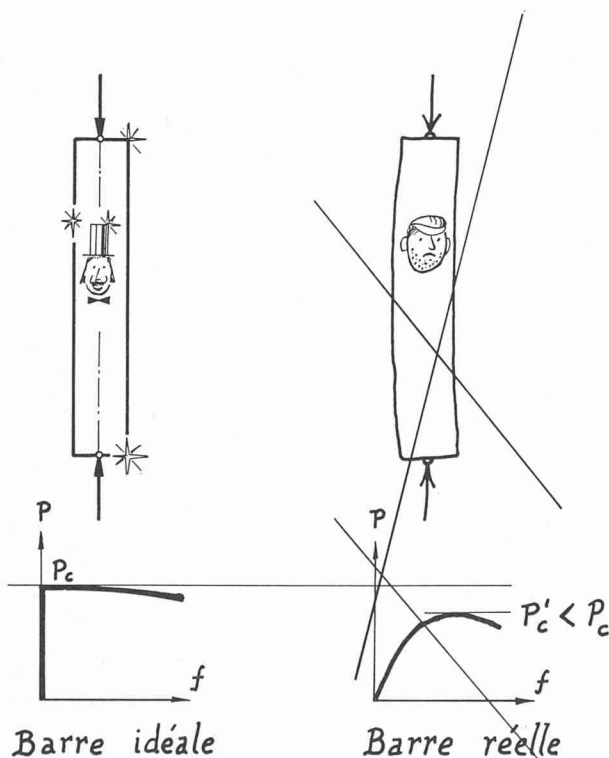


Fig. 5

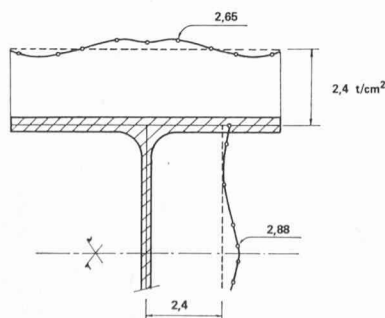


Fig. 6

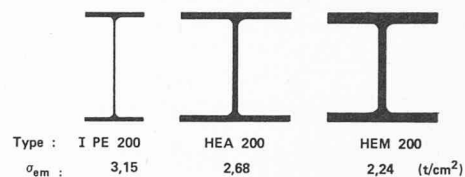


Fig. 7

d'excentricités, de plastification, de limite de proportionnalité, etc. On constate de plus (fig. 4) que les coefficients de sécurité sont d'une part variables avec l'élancement, et d'autre part différents de ceux adoptés pour une autre sollicitation (flexion par exemple); pourquoi? Parce que les calculs théoriques basés sur la doctrine adoptée ne coïncident pas avec les résultats expérimentaux. Ce dernier point (sécurité variable et différente selon la sollicitation) est hautement critiquable, parce qu'il va à l'encontre d'une doctrine cohérente de la sécurité.

Où est la cause principale de ces défauts, par ailleurs bien connus? Elle réside dans la doctrine de base, qui prend comme référence une barre idéale et parfaite (fig. 5), et ignore la réalité, qui est infiniment différente. Portant son attention sur cette dernière, la commission 8 a examiné les principales *imperfections* que l'on rencontre dans les barres industrielles laminées ou composées soudées. Ce sont les suivantes :

- sur la section droite d'un laminé, la limite élastique σ_e accuse une certaine dispersion (fig. 6);
- d'un profilé à l'autre, la limite élastique moyenne diminue avec l'augmentation de l'épaisseur des parois (fig. 7);
- tous les profilés sont le siège des contraintes résiduelles provoquées par le mode d'élaboration : laminage, soudage, dressage, découpage au chalumeau (fig. 8, 9 et 10);
- l'axe des colonnes n'est pas rectiligne (fig. 11).

Les travaux se sont alors déroulés sur deux plans : d'une part, sept pays entreprenaient un vaste programme de recherche expérimentale qui avait pour buts d'étudier statistiquement ces imperfections et d'effectuer des essais de flambement sur divers types de colonnes; d'autre part, on cherchait à simuler de manière théorique, puis numérique

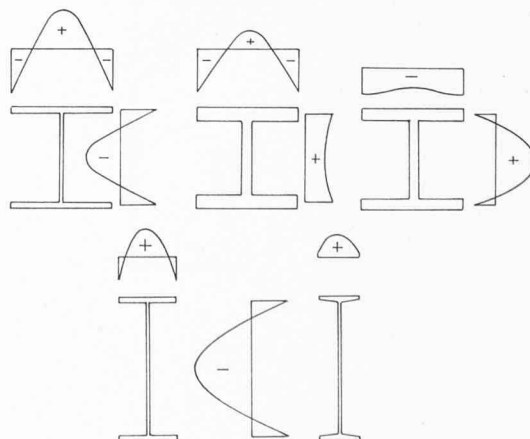


Fig. 8

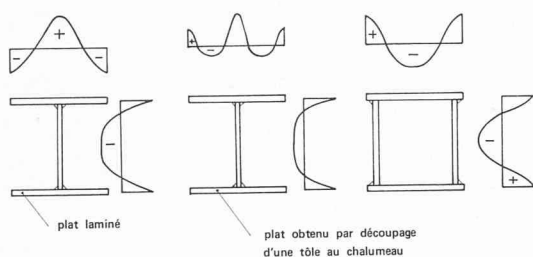


Fig. 9

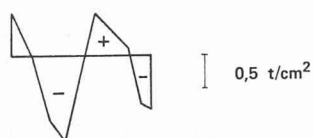


Fig. 10

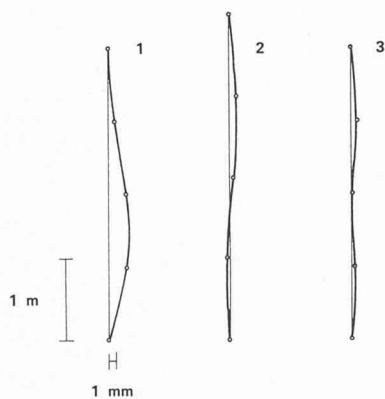


Fig. 11

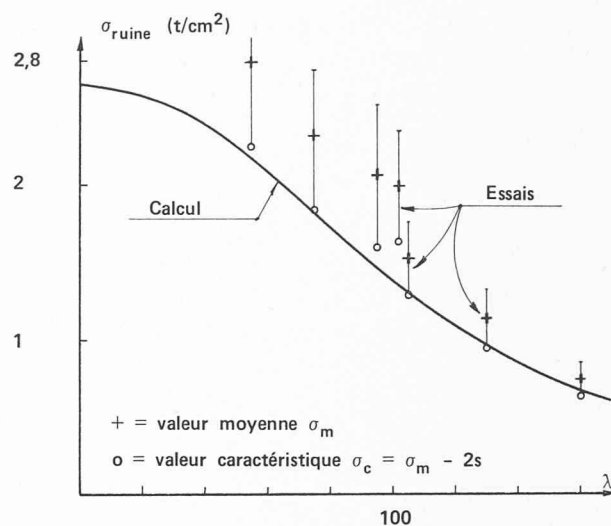


Fig. 13

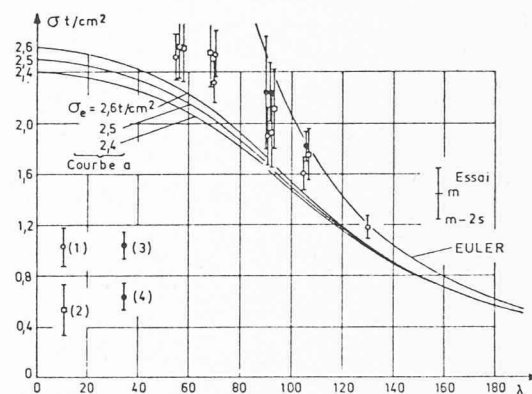


Fig. 14

(ordinateur), le processus de ruine d'une colonne réelle, en tenant compte de toutes ses imperfections, pour trouver en particulier sa *vraie force portante* (« charge critique »), et établir, par suite, des courbes de flambement.

La figure 12 illustre ces deux volets de la recherche par la comparaison expérience-calcul ; il s'agit dans les deux cas de la même barre, mais l'une, recuite, n'a pas (ou peu)

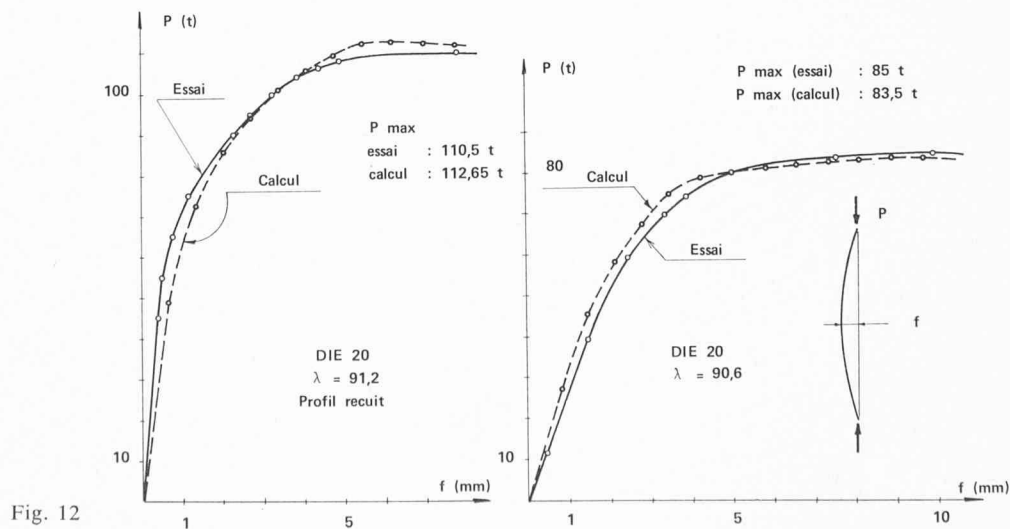


Fig. 12

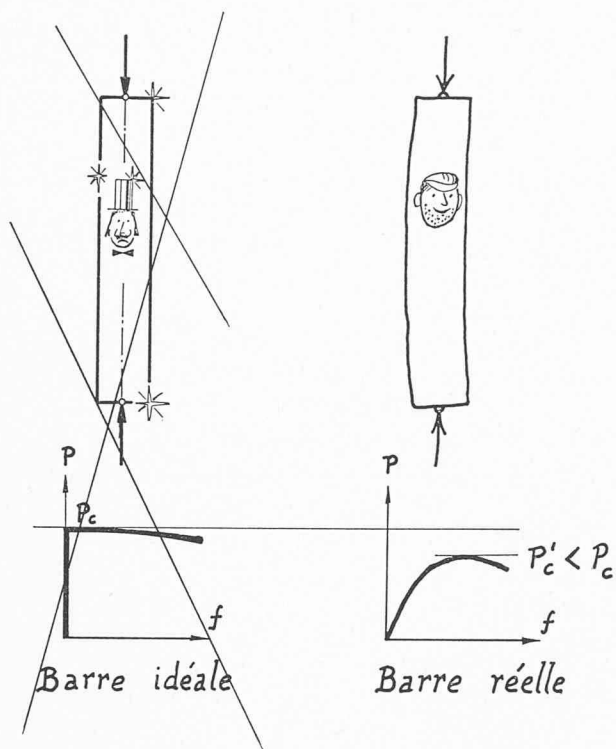


Fig. 15

de contraintes résiduelles ; la charge critique d'Euler de ces barres est de l'ordre de 145 tonnes ; on voit à quel point les imperfections abaissent cette valeur. A une plus vaste échelle, les figures 13 et 14 montrent les résultats statistiques d'essais de flambement (fourchette donnant 97,5 % de confiance) et les courbes calculées théoriquement, respectivement pour les laminés IPE 160 et les tubes ronds et carrés laminés sans soudure. On constate que, cette fois, *le calcul et l'expérience concordent* : c'est le résultat capital de ces travaux européens, résultat auquel il fallait absolument parvenir.

3. Etat actuel des résultats des recherches européennes

Le principe fondamental gouvernant les travaux relatifs aux problèmes d'instabilité est d'abandonner le concept eulérien de barre idéalement parfaite (fig. 15), et de considérer de façon réaliste la force portante des barres industrielles, affectées de manière aléatoire par leurs imperfections géométriques et structurales ; ce point de vue est d'ailleurs valable, pour tout élément ou structure en danger d'instabilité.

L'avantage essentiel de cette option est de fournir (fig. 16) soit les contraintes admissibles en divisant celles de ruine par un coefficient de sécurité *constant et identique* à celui employé par les autres sollicitations, soit une *valeur réaliste*

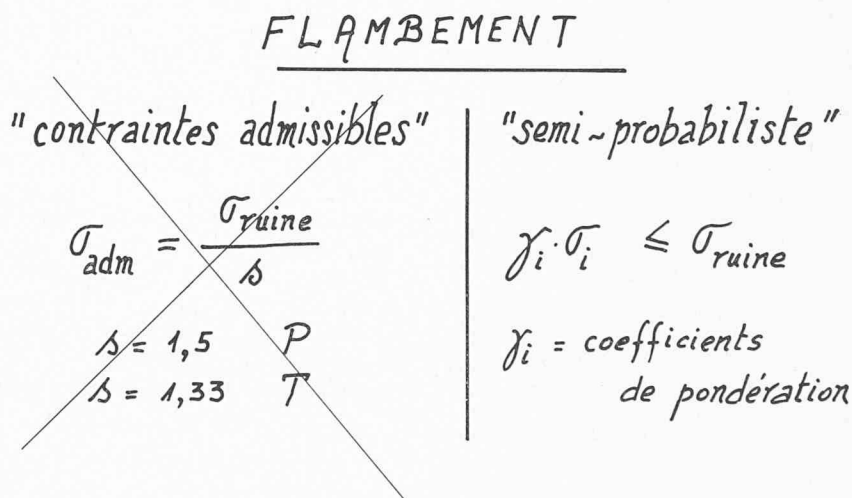


Fig. 16

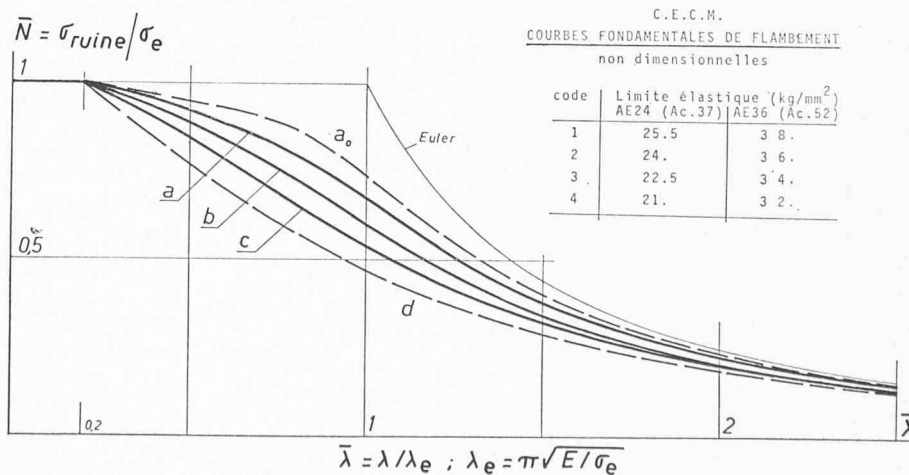


Fig. 17

de l'état limite ultime, qu'il est indispensable de connaître sûrement pour appliquer la doctrine semi-probabiliste de la sécurité au calcul des constructions, doctrine qui se répand actuellement de plus en plus.

Sur le plan pratique, la commission 8 a démontré qu'il ne fallait pas adopter une courbe de flambement unique pour toutes les colonnes industrielles. Elle a trouvé (fig. 17) qu'il est possible de rapporter toute colonne à l'une des cinq courbes fondamentales de flambement a_0 , a , b , c et d , représentées dans un diagramme non dimensionnel vis-à-vis de la limite élastique.

Les trois courbes a , b et c concernent toutes les barres industrielles courantes, qui sont classées selon les quatre critères suivants (fig. 18) :

- a) forme de la section,
- b) mode d'élaboration,
- c) plan de flambement,
- d) épaisseur des parois.

Pour une quelconque combinaison de ces critères, la courbe de flambement non dimensionnelle et la limite élastique (fig. 17) sont déterminées, ce qui permet de trouver la force portante de la colonne étudiée.

Les courbes a_0 et d n'ont encore qu'un caractère indicatif, parce qu'elles manquent à l'heure actuelle de confirmations expérimentales ; sujettes à modification (surtout la courbe d), elles s'adressent respectivement :

- à certains profils, aux caractéristiques spécialement favorables (tubes sans soudures finis à chaud), ou dont l'acier a une très haute limite élastique ($\sigma_e \geq 40 \text{ kg/mm}^2$) ;
- aux profils dont l'épaisseur des parois dépasse 40 mm (« Jumbo »), ou à toute autre barre dont les imperfections (surtout les contraintes résiduelles) sont particulièrement défavorables.

C.E.C.M. CLASSIFICATION des COLONNES		code en fonction de l'épaisseur t de la paroi	
		Courbe	$t \leq 20 \text{ mm}$ $20 < t \leq 30$ $30 < t \leq 40$
Tubes laminés finis à chaud		$a(a_0)$	1 2 3
Tubes soudés finis à chaud		a	2 3 4
Caissons composés soudés		b	2 3 4
Profils I laminés	 flambement autour de l'axe faible	$h/b > 1.2$ b	1 2 3
		$h/b \leq 1.2$ c	1 2 3
	 flambement autour de l'axe fort	$h/b > 1.2$ a	1 2 3
		$h/b \leq 1.2$ b	1 2 3
Profils I composés soudés	 axe faible	semelles oxycoupées b	2 3 4
		semelles laminées c	2 3 4
	 axe fort	semelles oxycoupées b	2 3 4
		semelles laminées b	2 3 4
Profils I laminés avec semelles de renfort soudées	 axe faible	a	1 2 3
	 axe fort	b	1 2 3
Caissons recuits		a	1 2 3
Profils I recuits	 axe faible	b	1 2 3
	 axe fort	a	1 2 3
Profils T ou U		c	1 2 3

Fig. 18

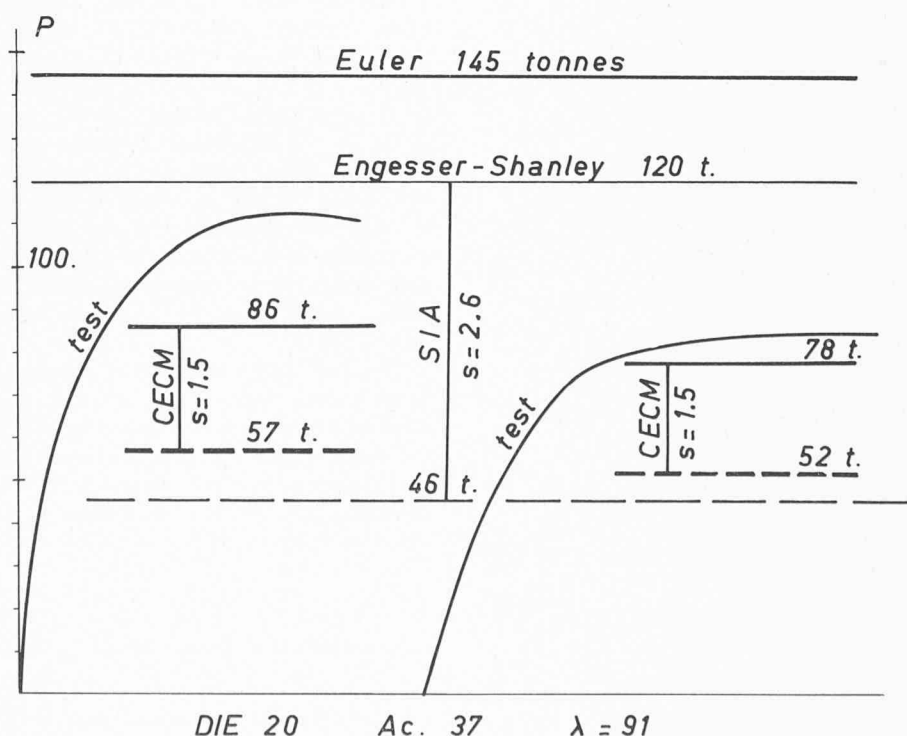


Fig. 19

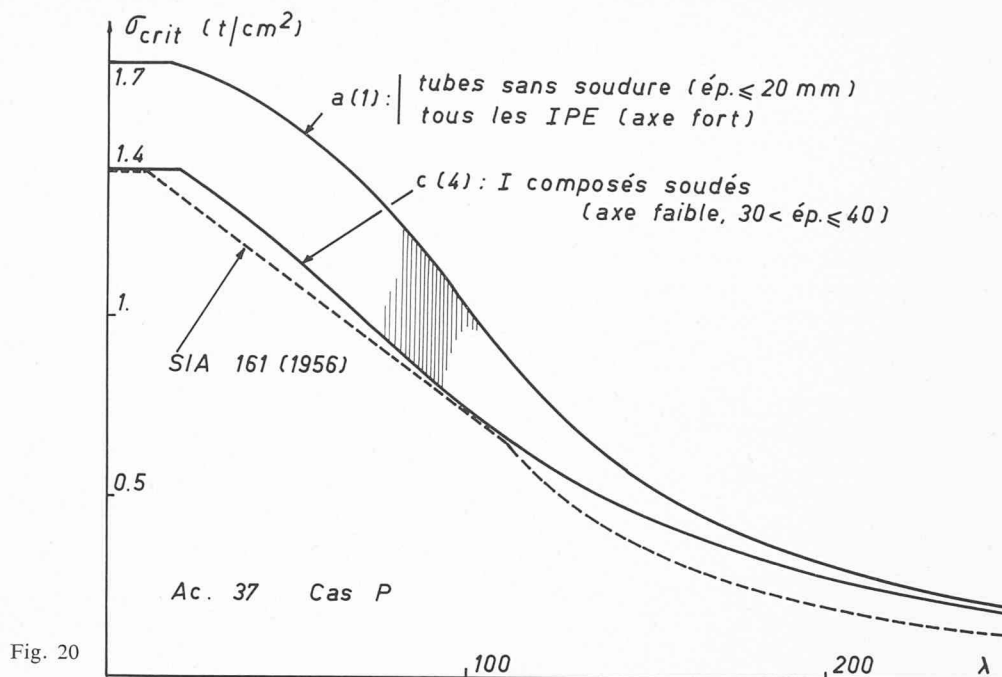


Fig. 20

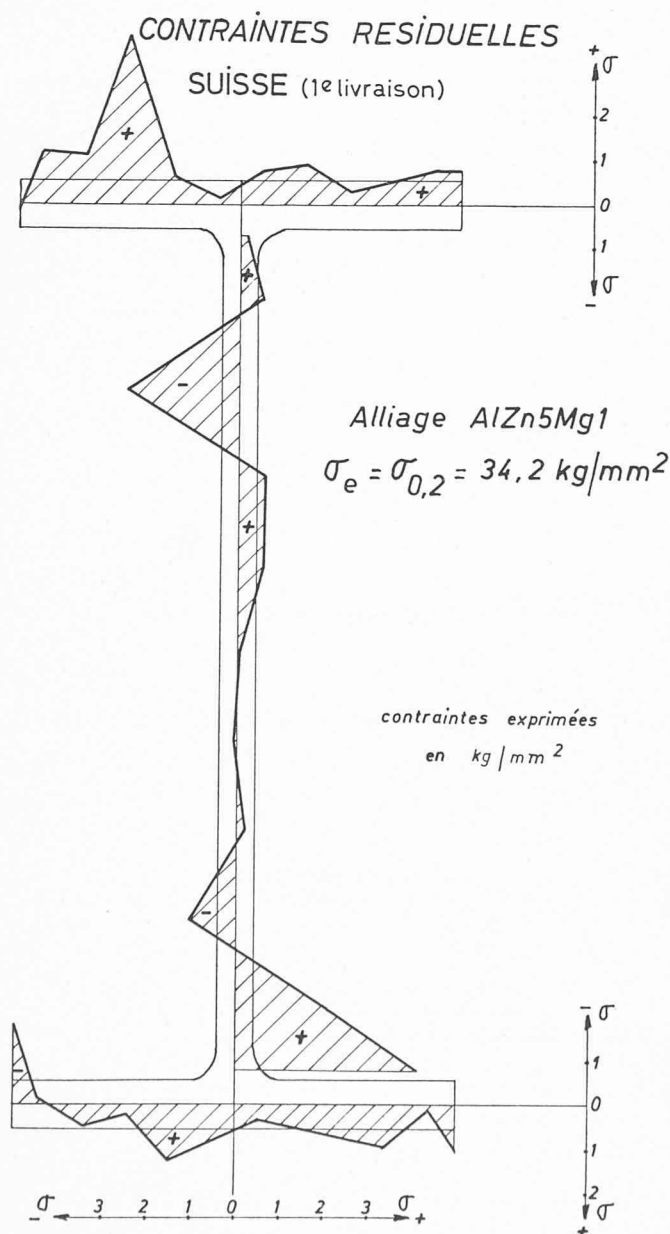


Fig. 21

Tels sont les principaux résultats disponibles à l'heure actuelle dans le domaine du flambement des colonnes, basés, rappelons-le, sur les hypothèses suivantes :

- les courbes sont valables pour les barres industrielles en acier, sollicitées centriquement et flambant par flexion dans un plan, à l'exclusion de tout autre phénomène d'instabilité ; les imperfections inhérentes à ces barres sont prises en compte ;
- les courbes s'entendent pour la barre biarticulée et s'étendent aux autres cas par la notion de longueur de flambement.

4. Quelques comparaisons

La figure 19 reprend les courbes d'essai des deux colonnes DIE 20 déjà présentées (fig. 12). Si l'on travaille avec la norme SIA (1956) actuellement en vigueur (sauf erreur), la charge admissible est la même pour ces deux colonnes et vaut 46 tonnes. La charge d'Euler est de 145 t et celle d'Engesser-Shanley (qui ne correspond d'ailleurs à rien pour l'acier doux) est de 120 t, ce qui fournit un « coefficient de sécurité » irréal de 2,6. Les recommandations de la CECM considèrent au contraire différemment les deux barres, trouvant pour celle de gauche, respectivement de droite, des charges de ruine de 86, respectivement 78 t, qui fournissent des charges admissibles de 57 et 52 t avec un coefficient de sécurité de 1,5. On voit clairement sur cette figure que ce dernier mode de calcul est beaucoup plus réaliste (surtout pour la colonne de droite) que celui de la norme SIA.

La figure 20 montre, dans le diagramme ($\sigma_{cr} - \lambda$) dimensionnel, pour l'acier 37 et le cas P, les deux courbes de flambement européennes respectivement la plus et la moins favorable (obtenue en divisant la contrainte de ruine par 1,5), ainsi que la courbe de la norme SIA 161. De manière générale, cette norme sous-estime la force portante des colonnes industrielles, et ce jusqu'à près de 50 % de cette force.

5. Extension à l'aluminium

Une recherche comparable est actuellement en cours dans le domaine des barres industrielles en aluminium,

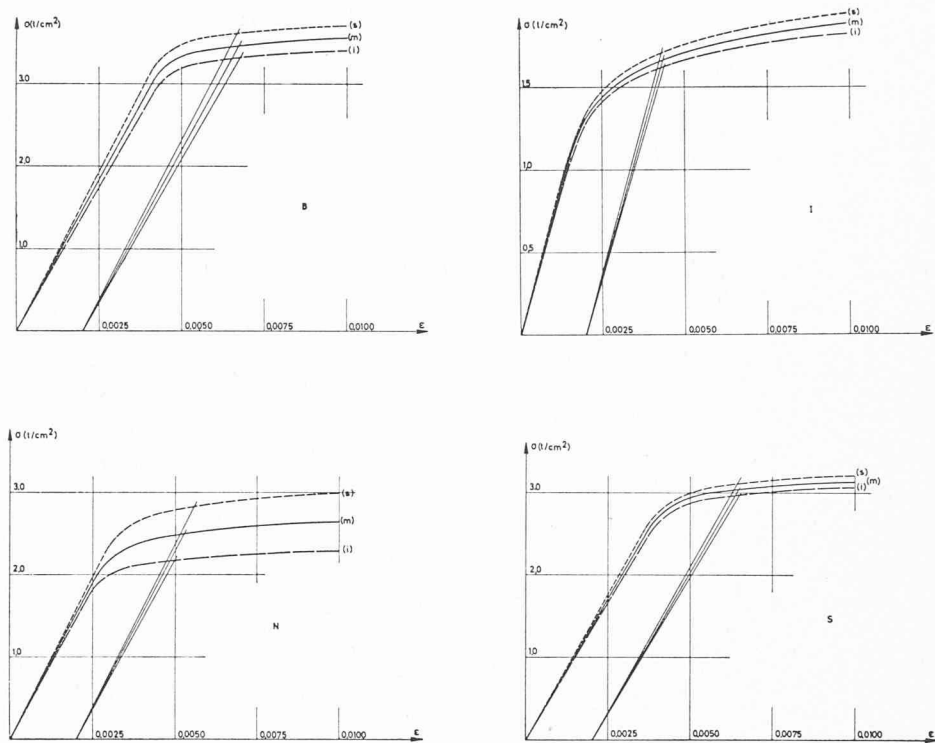


Fig. 22. — Lois contraintes déformations expérimentales (aluminium); loi de Ramberg-Osgood :

$$\varepsilon = \sigma/E + (\sigma/B)^n = \sigma/E + 0.002 (\sigma/\sigma_e)^n$$

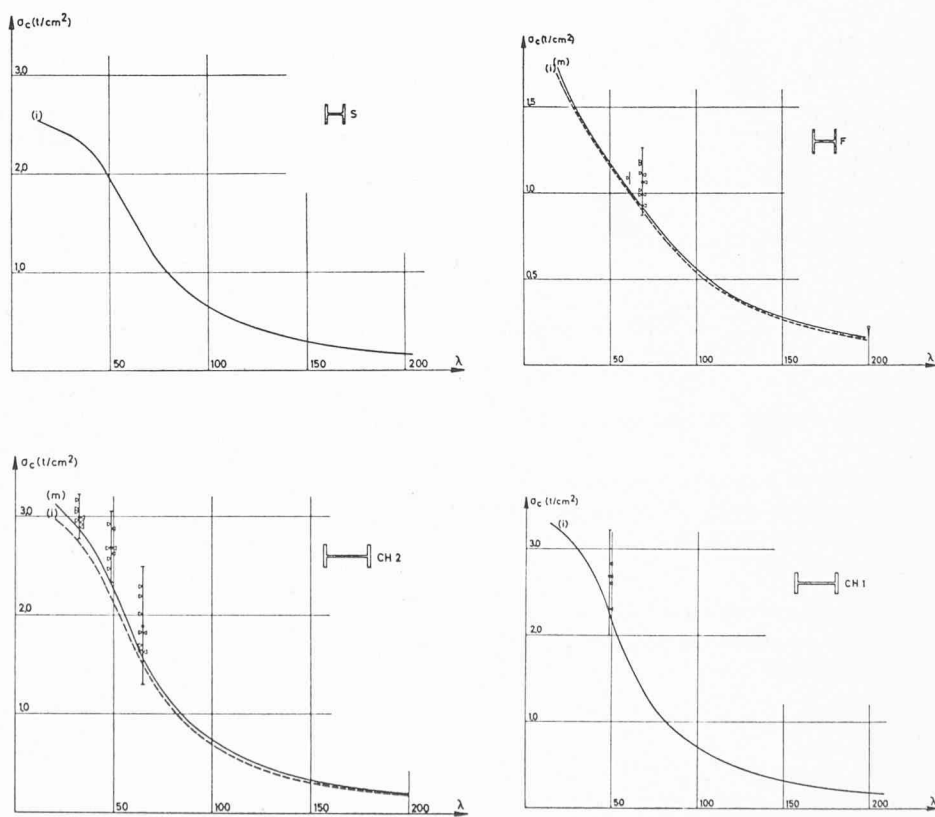


Fig. 23. — Courbes de flambement calculées et fourchettes expérimentales (aluminium).

Comparaison des courbes de flambage $\bar{N}-\bar{\lambda}$

Courbes caractéristiques inférieures

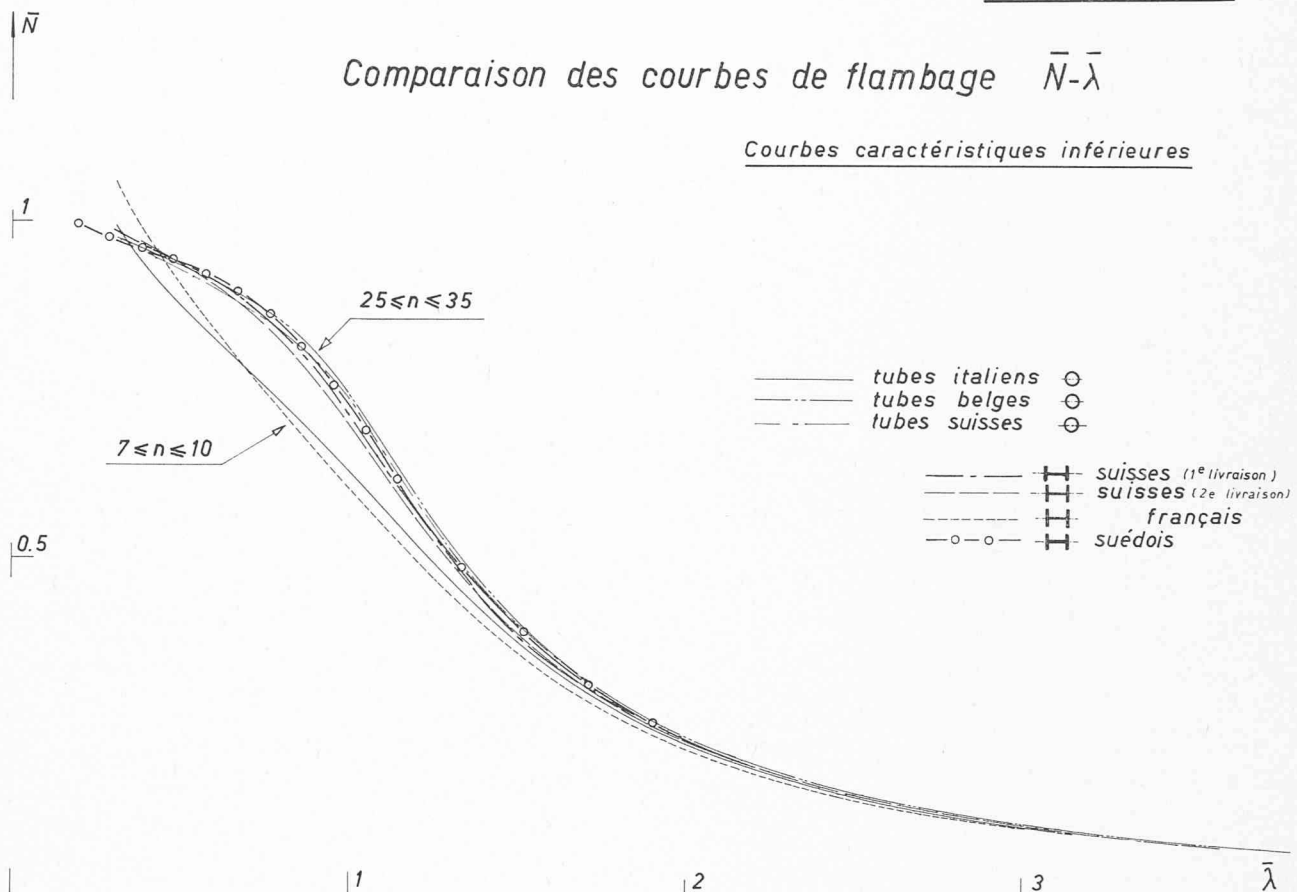


Fig. 24

sous la supervision du CIDA (Centre international de développement de l'aluminium). Un premier programme de recherche expérimentale et théorique a porté sur des profils en I et sur des tubes, obtenus par filage à la presse (extrusion), en provenance de six pays européens. Les conclusions de cette première recherche sont les suivantes :

- les contraintes résiduelles (fig. 21) sont faibles et négligeables ($< \sigma_e/10$) ;
- le diagramme contrainte-déformation de compression sur tronçons courts est représentable mathématiquement par une loi du type Ramberg-Osgood (fig. 22) ;
- expérience et théorie donnent des résultats concordants (fig. 23) ;
- les courbes de flambement non dimensionnelles semblent surtout dépendre du degré d'écrouissage de l'aluminium, caractérisé par le paramètre n de la loi de Ramberg-Osgood (fig. 24).

Les travaux dans ce domaine n'étant pas aussi avancés que dans celui de l'acier, on ne peut cependant pas encore employer ces résultats en pratique.

6. Conclusions

Il reste encore du pain sur la planche dans le domaine du flambement des colonnes industrielles : flambement des cornières, des barres composées, étrépillonnées, etc. ; flam-

bement par flexion et torsion, etc. On retiendra cependant que le problème a trouvé enfin sa vraie solution, grâce à laquelle on a maintenant une doctrine cohérente de l'instabilité en construction métallique appliquée.

Les nouvelles courbes de flambement européennes vont sortir de presse ; je conseille vivement aux ingénieurs de les employer intensivement.

BIBLIOGRAPHIE

- BEER, H. et SCHULZ, G. : *Die Traglast des planmässig mittig gedrückten Stabs mit Imperfektionen*, VDI - Zeitschrift 111 (1969), Nr. 21, S. 1537-1541 ; Nr. 23, S. 1683-1687 ; Nr. 24, S. 1767-1772.
- FREY, F. : *Calcul au flambement des barres industrielles*. Bulletin technique de la Suisse romande, 97^e année, n° 11, p. 239-250, 29.5.1971.
- SFINTESCO, D. : *Fondement expérimental des courbes européennes de flambement*. Construction métallique n° 3 (1970), p. 5-12.
- BEER, H. : *Aktuelle Probleme der Stabilitätsforschung*. Öster. Stahlbauverband, Stahlbautagung 1971 (Baden bei Wien).
- BERNARD, A., FREY, F., JANS, J., MASSONNET, CH. : *Recherches sur le comportement au flambement de barres en aluminium*. Mémoires de l'AIPC, vol. 1, 1973.

Adresse de l'auteur :

F. Frey
 Assistant à l'Université de Liège
 Institut du génie civil
 6, quai Banning, Liège (Belgique)