

**Zeitschrift:** IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH  
Kongressbericht

**Band:** 8 (1968)

**Artikel:** Solutions théoriques et résultats expérimentaux

**Autor:** Winter, George

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-8696>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 11.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## **II**

### **Structures en éléments minces**

#### **II a**

##### **Solutions théoriques et résultats expérimentaux**

GEORGE WINTER

Professor of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, N.Y.

#### **1. Généralités**

La très large utilisation des éléments formés à froid à partir de feuillards ou de tôles d'acier est un fait bien établi. Plusieurs millions de tonnes d'acier ont reçu cette destination, dans un grand nombre de pays, au cours des vingt dernières années. C'est aux Etats-Unis, à la Cornell University, en 1939, que les premières recherches en ce domaine furent entreprises, et que le premier règlement officiel [1], maintenant à sa quatrième édition, a été publié en 1946 par l'American Iron and Steel Institute; des codes à peu près semblables ont depuis lors été adoptés au Canada, en Australie, en Inde et ailleurs. En Grande-Bretagne, on a adopté, en 1961, des normes de calcul [2] établies pour la plus grande part sur la base d'études britanniques [3]; des développements semblables sont en cours en France et ailleurs. Des traductions de l'American Design Manual ont été publiées en Allemagne, en Espagne et au Mexique, et il en existe du moins des versions françaises et italiennes. Le rapporteur a présenté en 1952 [4] à l'A.I.P.C. un aperçu de la théorie et de la pratique en cette matière, et un exposé plus récent a été fait, en allemand, en 1963 [5]. Les applications pratiques, leur état actuel et leur évolution probable, sont traitées par le Docteur J. B. Scalzi dans son rapport sur le Thème II b inclus dans le présent volume.

Des enseignements pratiques d'une vaste expérience, il ressort que ce type de construction ne concurrence pas, mais complète plutôt la construction métallique traditionnelle qui fait usage de tôles et de profilés laminés à chaud. La situation est un peu comparable à celle de la construction en béton, ou, de plus en plus, le béton précontraint se révèle comme étant complémentaire du béton

armé, dont l'emploi est de plus longue date, et non pas comme un objet de concurrence. En fait, dans une perspective plus large, il apparaît que la construction métallique, d'une part, et le béton, d'autre part, ne doivent pas être simplement considérés comme se concurrençant ou s'excluant mutuellement, mais bien dans leur complémentarité (cf. 7). On gagnerait beaucoup si l'art de construire, au lieu de rester fragmenté en secteurs concurrents, pouvait se développer dans un cadre uniifié et non plus compartimenté.

L'objet de ce rapport est de présenter une analyse succincte des particularités les plus importantes du comportement des éléments légers travaillés à froid telles qu'elles apparaissent à la suite de récentes recherches tant théoriques qu'expérimentales. De nombreuses références bibliographiques seront données en ce qui concerne les travaux de recherches et l'on soulignera les secteurs dans lesquels il apparaît urgent d'entreprendre de nouvelles études.

## 2. Propriétés des matériaux et leurs conséquences

Par comparaison avec les aciers utilisés dans les tôles et profilés laminés à chaud, ceux qu'on emploie dans les éléments de construction formés à froid ont une gamme plus étendue et subissent un grand nombre de processus de fabrication qui affectent très sensiblement leurs propriétés finales et leur comportement. On distingue les tôles et les feuillards d'acier sensibles au vieillissement de ceux qui ne le sont pas. Ils sont amenés à leur épaisseur finale, soit directement par laminage à chaud, soit par laminage à froid à partir d'une épaisseur initiale plus forte. Ces variations ont une influence sur leurs diagrammes contraintes-allongements et sur leurs comportements à l'intérieur de la construction. En particulier, les tôles laminées à chaud présentent un palier de plasticité net alors qu'avec les matériaux réduits par laminage à froid, la limite de proportionnalité est plus basse et le diagramme contraintes-allongements s'infléchit progressivement. Ces différences sont importantes eu égard à la résistance au voilement. Au bout d'un certain temps, après l'opération d'écrouissage résultant du laminage ou du formage à froid, les aciers qui vieillissent recouvrent leur caractère de plastification brutale, ce qui leur confère souvent un avantage sur les aciers ne vieillissant pas.

Au cours du formage à froid des profilés à partir de tôles planes, on obtient divers degrés d'écrouissage dans les différentes parties de la section. De nombreux essais [6, 7] ont fait ressortir des accroissements d'environ 30 à 100% de la limite élastique dans les courbes et les angles; en ce qui concerne les parties planes des profilés formés par machines à galets, on a constaté des augmentations de 15 à 50%, alors qu'aucune modification significative n'a été trouvée dans les parties planes des profilés formés à la presse.

Jusqu'à présent, on se basait généralement sur la résistance minimum garantie de l'acier avant formage pour calculer les capacités portantes [1, 2]. La

valeur, plus élevée, de la résistance de l'acier après formage à froid ne pouvait être prise en compte qu'à condition qu'il soit possible de la prédire et de la vérifier de façon sûre. Des recherches récentes, entreprises à cet effet, ont mis en lumière les faits suivants [6, 7]:

1. On ne constate pas d'effet Bauschinger apparent. Autrement dit, il n'y a pas de différence importante entre les diagrammes contraintes-déformations à la compression et à la traction des matériaux fortement écrouis, particulièrement dans les zones des coudes et des angles. Cela se comprend étant donné que le formage consiste essentiellement en une flexion transversale par rapport à l'axe de la pièce. L'absence d'effet Bauschinger peut donc être prévue d'après la théorie de la plasticité (par exemple, le principe du volume constant).

2. La limite élastique  $\sigma_{yc}$  d'un angle ou d'une partie courbe après formage dépend de la limite élastique initiale  $\sigma_y$  avant formage, du rapport de la charge limite de rupture initiale  $\sigma_u$  à la limite élastique  $\sigma_y$  et du rapport du rayon de courbure intérieur  $r$  à l'épaisseur du matériau  $t$  conformément à la relation suivante [6]:

$$\sigma_{yc} = \frac{kb}{(r/t)^m} \quad (1)$$

où le coefficient de résistance  $k = 2,80\sigma_u - 1,55\sigma_y$ ,

le coefficient d'écrouissage  $n = 0,225\sigma_u/\sigma_y - 0,120$ ,

$b = 1,0 - 1,3n$  et  $m = 0,855n + 0,035$ .

La forme générale de la relation (1) a été établie sur la base des principes de la théorie de la plasticité, et la valeur des constantes numériques a été déterminée à partir de nombreux essais.

3. Si l'on connaît séparément les propriétés des matériaux constituant les différentes parties (planes, angulaires et incurvées) d'un profilé, on peut calculer de façon satisfaisante, en prenant la moyenne pondérée, la limite élastique et le comportement contraintes-déformations de l'ensemble du profilé.

4. On peut calculer, de la manière indiquée dans [7], l'effet dû aux propriétés différentes de l'acier, dans diverses parties du profilé, s'exerçant sur la résistance inélastique au flambement des pièces comprimées.

De nouvelles recherches sont nécessaires pour pouvoir déterminer: a) les effets des différents procédés de formage sur les propriétés des parties planes, b) la manière selon laquelle on peut délibérément employer et modifier les diverses opérations de travail à froid pour accroître la résistance des pièces [8], c) les effets d'un écrouissage non uniforme sur la résistance à la torsion et la résistance au voilement.

Ce qui précède se rapporte aux aciers au carbone ou faiblement alliés. On a de plus en plus recours aux aciers inoxydables dans les applications architecturales et certaines applications industrielles spéciales. Dans [9] il est fait état de quelques-uns des problèmes liés à la très nette disparité du comportement contraintes-déformations des aciers inoxydables.

### 3. Instabilité locale et comportement post-critique

En ce qui concerne les plaques et les voiles minces il est, d'une manière générale, admis que les contraintes et charges critiques déterminées par les méthodes classiques des valeurs caractéristiques n'ont bien souvent aucun rapport avec la résistance effective au voilement. Il en va ainsi lorsqu'il n'est pas possible de développer la configuration voilée à partir de la surface non voilée. Dans ce cas, le voilement naissant crée des efforts de membrane dont, bien souvent, les effets régissent le comportement ultérieur au voilement. Ces contraintes de membrane peuvent avoir un effet d'instabilité, par exemple dans les pièces cylindriques comprimées axialement ou les sphères comprimées radialement; dans ce cas, il peut y avoir un affaissement brusque, et alors, des imperfections initiales même faibles peuvent conduire à une réduction considérable de la résistance au voilement. Dans d'autres cas, les contraintes des membranes ont un effet de stabilisation, de sorte que la résistance ultime effective peut se trouver être très largement supérieure à la contrainte critique établie par le calcul. Il en est ainsi dans le cas de plaques soumises à un effort de compression, de flexion ou de cisaillement dans leur plan et au moins raidies le long de certains de leurs bords. Dans son rapport sur le Thème IIc, inclus dans le présent volume, le Professeur Massonet étudie le comportement post-critique des plaques travaillant au cisaillement et à la flexion. Ici, il est question de plaques travaillant à la compression, avec ou sans raidisseurs intermédiaires, qui entrent dans presque toutes les pièces de charpente légères.

Dans le cas des plaques soumises à une compression longitudinale, c'est en fonction d'une largeur équivalente ou efficace que, très simplement, l'on exprime le comportement post-critique. Ce concept, dû à von Karman qui l'a établi pour le calcul de la résistance après voilement, a été modifié et généralisé par le rapporteur de façon qu'il puisse s'appliquer également à la rigidité post-critique longitudinale [10, 11]. Les résultats d'un grand nombre d'essais ont permis d'établir la relation suivante, donnant la largeur équivalente d'une plaque raidie le long de ses deux bords longitudinaux:

$$\frac{b_e}{b} = \frac{1,9}{(b/t)} \sqrt{\frac{E}{\sigma_{max}}} \left[ 1 - \frac{0,475}{(b/t)} \sqrt{\frac{E}{\sigma_{max}}} \right] = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \left( 1 - 0,25 \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \right) \quad (2)$$

avec  $b$  = largeur et  $t$  = épaisseur de la plaque,  $b_e$  = sa largeur équivalente,  $\sigma_{max}$  = contrainte maximum aux bords longitudinaux,  $\sigma_{cr}$  = contrainte critique classique pour des bords simplement appuyés. La ruine de la plaque intervient lorsque  $\sigma_{max} \rightarrow \sigma_y$ , c'est-à-dire quand la contrainte au bord atteint la limite élastique. A ce moment, l'effort de compression qui entraîne la ruine de la plaque est  $b_e t \sigma_y$ .

Cette expression place à l'intérieur de la bande de dispersion des résultats d'essais mais à proximité de la limite inférieure de celle-ci et a été utilisée avec

succès, depuis 1946 [1]. Il a été récemment montré qu'elle a une bonne concordance avec la moyenne des résultats expérimentaux relatifs à l'acier inoxydable traité par recuit [9]. En ce qui concerne l'acier au carbone, Monsieur SKALOUD a récemment montré que l'équation 2 concordait de façon satisfaisante, en restant du côté de la sécurité, avec ses propres essais très soignés [12]. A la lumière d'une longue expérience et d'une nouvelle documentation expérimentale semblable à celle de Skaloud, il semble maintenant possible de proposer une expression un peu moins sévère qui consiste dans l'équation 2, à remplacer le coefficient 0,25 par 0,22 dans la seconde forme ou encore à remplacer 0,475 par 0,418 dans la première forme.

Dans le cas des plaques raidies le long des deux bords longitudinaux et, de plus, munies de raidisseurs longitudinaux intermédiaires, la Section 2.3.2. des normes américaines [1] donne la rigidité minima que doivent posséder les raidisseurs pour se révéler pleinement efficaces eu égard au comportement post-critique de la plaque. De la même façon, cette disposition a été confirmée par des essais indépendants exécutés par SKALOUD [13]. D'autres données sont nécessaires en ce qui concerne les plaques pourvues de raidisseurs dont la rigidité est inférieure à la valeur minima définie ci-dessus pour que l'efficacité des raidisseurs soit totale.

Les relations que l'on utilise avec succès dans le calcul des plaques avec et sans raidisseurs sont de nature semi-empirique. Plus précisément, leur forme générale procède de considérations théoriques alors que ce sont des essais qui ont permis de fixer les constantes numériques. Il serait souhaitable de disposer d'une analyse rigoureuse et entièrement théorique du comportement et de la résistance post-critique. Les études théoriques satisfaisantes qui existent concernent exclusivement le premier stade du comportement post-critique, il n'y en a pas pour les stades ultérieurs dont l'importance pratique est bien plus grande [14]. Il serait également souhaitable de réunir, par des recherches théoriques et des essais, des données sur le comportement post-critique des plaques anisotropes. L'anisotropie en question peut être le fait du matériau lui-même, par une direction d'écrouissage privilégiée, ou bien être de nature géométrique, comme dans les plaques pourvues de petits raidisseurs faiblement espacés.

Dans les pièces comprimées à paroi mince et d'élancement moyen ( $L/r \simeq 25$  à 90), il existe une interaction entre la résistance après voilement et le flambement. Par des études théoriques et des essais, BIJLAARD et FISHER [15] ont établi: a) qu'il existait une résistance post-critique dans les éléments comprimés, autrement dit, que ce peut être sous-estimer grossièrement la capacité portante que d'appliquer la méthode conventionnelle consistant à calculer indépendamment les contraintes critiques propres au voilement et au flambement et à adopter la plus faible des deux pour le dimensionnement; b) que dans le domaine post-critique du comportement des plaques il y avait des phénomènes importants d'interaction entre le voilement local et le flambement. Ce fait est pris en compte sous une forme simplifiée dans les méthodes de calcul en vigueur depuis longtemps [1].

#### 4. Flambement de torsion

Dans le cas des profils fermés à paroi mince, tels que les tubes, la rigidité à la torsion de Saint-Venant est proportionnelle à l'épaisseur et, pour l'essentiel, à la troisième puissance des dimensions principales de la section. Mais c'est le contraire s'il s'agit de profils ouverts : la rigidité de Saint-Venant est proportionnelle à la troisième puissance de l'épaisseur et à la première puissance des autres dimensions principales. C'est la raison pour laquelle le flambement en torsion joue un rôle plus important avec les profils ouverts à parois minces qu'avec les sections à profil ouvert et parois épaisses ou encore les sections à profil fermé.

La théorie générale de l'instabilité élastique en présence d'efforts de flexion et de torsion est bien développée, plus particulièrement par V.Z. VLASOV [16]. Pour le calcul, les difficultés que l'on rencontre sont les suivantes : a) A l'exception de certains cas particuliers simples, c'est un problème trop compliqué et trop long pour la pratique courante que la résolution des systèmes d'équations aux dérivées partielles auxquels on se trouve confronté; b) Dans le domaine plastique, il est difficile de modifier convenablement la théorie élastique; les diverses actions simultanées sont régies par des modules différents (flexion, torsion, gauchissement, etc.). Dans le cas des sections symétriques simples, il y a, au moins, les deux cas extrêmes, celui de la flexion simple, d'une part et celui de la compression axiale d'autre part, que l'on peut traiter assez facilement de la façon suivante :

*Flexion simple.* La théorie du déversement latéral des poutres a été établie depuis longtemps. De faibles différences intéressent la disposition des charges (par exemple : charges uniformément distribuées; charges concentrées aux tiers de la longueur où les moments uniformes ont peu d'influence sur la valeur des contraintes critiques, de sorte que, pour effectuer le dimensionnement, il est souvent satisfaisant de prendre l'expression la plus simple, c'est-à-dire celle des moments uniformes. De plus, pour les pièces à paroi mince, le terme faisant intervenir la rigidité torsionnelle de Saint-Venant est souvent négligeable par comparaison avec la rigidité au gauchissement [17]. Ceci permet d'établir de très simples formules de dimensionnement [1, 17].

*Compression axiale.* Si, dans ce cas, la théorie est relativement simple, il se présente des difficultés pratiques qui sont les suivantes : a) les expressions des charges critiques sont interminables et font intervenir de nombreuses caractéristiques différentes aux sections; b) une section donnée, par exemple un simple profil en U, peut flamber de deux façons, soit par flexion à la torsion, soit par flexion simple, selon les dimensions relatives de la section et la longueur, ainsi que le montre le schéma de la figure 1. Plusieurs simplifications de calcul ont été proposées. KLÖPPEL-SCHARAT [18] présentent des méthodes permettant de calculer un élancement équivalent qui est ensuite utilisé comme si la pièce flambait par flexion. CHAJES-WINTER [19] ont choisi une méthode qui met en relief le comportement réel. Pour la plupart des sections symétriques rencon-

trées dans la pratique, ils présentent des abaques du type de la figure 1, qui permettent de déterminer rapidement le mode de flambement qui l'emporte. Si c'est le flambement en flexion, les équations usuelles sont valables; si c'est le flambement en torsion, on recourt à une autre série d'abaques pour déterminer la charge de flambement. Des essais [20] ont montré que: 1. dans le domaine élastique, la théorie permet de déterminer avec précision les charges de flambement; 2. dans le cas de certaines sections, il existe dans le domaine élastique une résistance post-critique importante accompagnée toutefois de fortes déformations dues à la torsion; 3. dans le domaine non élastique, on obtient des résultats satisfaisants en adoptant l'hypothèse, qui pourtant ne se justifie pas d'une manière rigoureuse, suivant laquelle le module tangent est déterminant.

*Système de charges général.* Dans le cas général (par exemple compression excentrée, ou charges axiales plus charges transversales, avec diverses conditions aux appuis), les équations différentielles deviennent réellement compliquées [16], et ce, même en négligeant les effets des déformations inférieures aux déformations critiques stables. Des solutions faisant appel aux calculatrices ont été établies pour certains cas [21, 22]. Des recherches sont en cours en vue de déterminer une possibilité de trouver des approximations d'une précision raisonnable, en se basant sur la forme habituelle de l'équation d'interaction des phénomènes d'affaissement impliquant une bimodalité, c'est-à-dire l'équation:

$$(\sigma_a/\sigma_{cr,a})^m + (\sigma_b/\sigma_{cr,b})^n = 1 \quad (3)$$

où  $a$  et  $b$  caractérisent les deux modes simples, concernant en l'occurrence le chargement transversal et le chargement axial. Certains travaux ont été consacrés à l'instabilité non-linéaire (effet destabilisateur des déformations progressives) des pièces soumises à une flexion et à une torsion combinées [23].

Aussi bien dans le domaine de la théorie que dans celui des essais ou de la recherche de simplifications de calcul, il est nécessaire d'étudier davantage les effets des différentes combinaisons des conditions aux extrémités (à la flexion, à la torsion et au gauchissement), les effets de comportement non élastique, des imperfections initiales et des déformations avant flambement, ainsi que le cas difficile des sections non symétriques de forme totalement arbitraire.

## 5. Distorsion des sections

Lorsque le rapport largeur/épaisseur a une valeur élevée, il peut se faire que la section d'une pièce présente une importante distorsion. Celle-ci peut être stable ou instable; elle peut avoir une importance, soit sur le plan esthétique, soit par son effet défavorable sur la résistance de la pièce.

Un exemple simple en est donné par la section représentée à la Fig. 2. Utilisée comme poutre à des contraintes inférieures à la valeur critique la pièce a

tendance à subir une distorsion qui lui confère la forme d'auge qu'on voit représentée, et ce en raison de la composante radiale, dirigée vers le bas, des efforts longitudinaux de flexion dans l'aile de grande largeur. Des méthodes de calcul ont été développées pour faire face à cette situation [1, 17]. Si l'on place la même pièce à l'envers, en l'utilisant comme poutre, les deux ailes étroites comprimées peuvent devenir individuellement instables avec distorsion de la section. Une théorie approchée a été élaborée qui rend compte de ce comportement, vérifiée par de nombreux essais [24], et une méthode de calcul simplifiée [1] a été établie.

L'interaction du voilement et du flambement dans le domaine post-critique a été abordée au chapitre 3 ci-dessus. En ce qui concerne les effets de la déformation de la section sur le flambement en torsion, on a établi une méthode de calcul électronique applicable aux sections à simple symétrie [22]. On n'a pas encore mesuré l'importance qui, pour le calcul, s'attache à cette interaction du voilement et du flambement en torsion par rapport au procédé conventionnel qui consiste à calculer indépendamment les deux types d'instabilité. Cette question nécessite des recherches supplémentaires.

Un autre problème se pose lorsqu'on utilise des profils légers afin de réaliser des murs rideaux. Dans ce cas, les variations de température peuvent provoquer dans les panneaux des distorsions qui présentent alors des inconvénients d'ordre esthétique. Ce type de déformation doit aussi être étudié. Pour le voilement dû à la température, il n'est pas suffisant de disposer d'une théorie simple basée sur les valeurs caractéristiques, car on doit être en mesure de calculer la grandeur des distorsions correspondantes pour pouvoir juger si elles sont ou non acceptables du point de vue esthétique.

## 6. Diaphragmes minces en acier sollicités au cisaillement

En raccordant le long de leurs bords ou de leurs joints des tôles ondulées, des panneaux de planchers ou de bardage ou de couverture nervurés, on obtient des diaphragmes continus. Ceux-ci présentent une résistance et une rigidité importantes s'ils sont chargés dans leur plan. Il y a longtemps qu'ils sont utilisés dans les couvertures et les planchers tant pour résister aux poussées horizontales du vent ou aux charges sismiques, que pour les transmettre aux plans de contreventement vertical tels que les murs de refend.

Ainsi utilisés, les diaphragmes sont conçus pour résister aux efforts tranchants dans leur plan. Leurs caractéristiques essentielles sont donc leurs effets de résistance et de rigidité vis-à-vis des efforts tranchants.

En raison de la grande diversité, tant des formes de panneaux métalliques minces que des moyens utilisés pour les assembler entre eux (coutures) ou avec l'ossature du bâtiment, il s'est avéré nécessaire d'éprouver chaque système pour en déterminer les caractéristiques [25, 26]. D'une manière générale, on constate

que la résistance au cisaillement d'un diaphragme dépend non seulement de la configuration et de l'épaisseur des panneaux qui le constituent mais aussi du type et de l'espacement des moyens d'assemblage. Les vents et les secousses sismiques donnent libre cours généralement à un petit nombre d'efforts répétés ou alternés de forte intensité. Des essais montrent que les diaphragmes soudés sont assez peu sensibles à ces chargements cycliques alors que les diaphragmes assemblés par vis peuvent se trouver affaiblis par des alternances d'efforts d'intensité élevée mais néanmoins inférieure à l'intensité de la charge de rupture.

Ce n'est pas seulement par la déformation due au cisaillement des panneaux eux-mêmes que la rigidité au cisaillement est déterminée, mais aussi par les déformations locales autour des coutures et à proximité des nœuds d'extrémité, ce qui rend la rigidité au cisaillement dépendante de la longueur des panneaux.

## 7. Constructions hybrides

Faute d'une dénomination établie, on adoptera ici le terme de «construction hybride» pour désigner tout système faisant intervenir, pour concourir à la résistance, l'action combinée d'éléments minces, formés à froid, et d'autres éléments, ces derniers pouvant être des profilés métalliques laminés à chaud ou encore du béton armé ou non, ou les deux. L'importance que revêt cette solution a été soulignée au chapitre 1 ci-dessus. En fait, c'est dans l'un ou l'autre des types de constructions hybrides que les éléments minces en acier sont les plus utilisés actuellement. Nous n'en mentionnerons que deux types à propos des recherches effectuées en ce domaine, à savoir les diverses fonctions des diaphragmes de cisaillement et les constructions mixtes acier-béton.

*Diaphragmes de cisaillement.* Les diaphragmes utilisés dans les planchers et les couvertures contre les efforts horizontaux ne résistent qu'au cisaillement. Il en est ainsi parce que les tôles nervurées sont capables de résister à des contraintes de cisaillement élevées supérieures ou non à la valeur critique par l'intervention du champ de contrainte. Par contre, elles offrent une faible résistance aux efforts normaux perpendiculaires aux ondulations ou aux nervures. Il faut donc, d'une façon quelconque, opposer une résistance aux moments fléchissants dans le contreventement par diaphragmes. Quand la charpente est une construction métallique classique, comme c'est ordinairement le cas, le diaphragme est soudé à l'ossature. Dans ce cas, les poutres métalliques situées sur le contour du diaphragme résistent aux moments fléchissants. Autrement dit, la construction hybride, constituée par le diaphragme de cisaillement léger et les profilés lourds laminés à chaud que sont les poutres du contour, opère comme une poutre à âme pleine horizontale dont l'âme est représentée par le diaphragme et les membrures par les poutres du contour [25].

Dans les voiles de couverture métallique aussi, l'emploi des diaphragmes hybrides prend rapidement de l'extension. Du fait de la nature des propriétés

des diaphragmes nervurés, ces voiles, où les surfaces travaillent essentiellement au cisaillement tandis que les efforts normaux sont supportés par les pièces de bordure, sont particulièrement propres à cet usage. On a été amené à constater que les formes prismatiques (voiles polygonaux) et les paraboloïdes hyperboliques entraient dans cette catégorie. Ces deux types de construction ont été essayés [27, 28] et les formes prismatiques, tout particulièrement, se sont révélées simples, adaptables et sûres. Plus d'une centaine de types de couverture ont été mis en place. Le rapport du Dr Scalzi sur le Thème II b contient d'autres indications sur les développements que connaissent dans la pratique les voiles de couverture métallique.

D'autres recherches sont nécessaires dans ce domaine. Certaines sont en cours, notamment celles relatives à des problèmes tels que : le voilement et le comportement post-critique des diaphragmes plans ou courbes nervurés (orthotropes) lorsqu'ils sont sollicités au cisaillement ; la stabilité des pièces de bordure de ces voiles qui sont chargées tangentiellement à leur axe par des efforts de cisaillement en provenance du voile ; une théorie du calcul des flèches de ces voiles sous une charge uniforme ; les flèches locales de ces voiles sous des charges concentrées ou partielles, etc.

Un autre type d'action se manifeste dans les bâtiments à ossature métallique de type courant (à un ou plusieurs étages) lorsqu'on a recours à des diaphragmes pour réaliser les couvertures, les murs ou les planchers. Convenablement calculés, ces diaphragmes confèrent un appui élastique aux éléments de la charpente, susceptibles de flamber dans le plan des diaphragmes. Ce phénomène concerne le flambement de flexion et de torsion des poteaux ainsi que les poutres de plancher et de couverture dont le déversement se trouve empêché. La théorie de cette action [29], c'est-à-dire du flambement en présence d'un appui élastique représenté par un milieu résistant au cisaillement, a été développée, et largement vérifiée expérimentalement. Si les pièces de charpente sont disposées de manière que leurs axes faibles soient perpendiculaires aux diaphragmes, cet entretoisement par diaphragmes peut accroître plusieurs fois leur capacité portante.

E. R. BRYAN et ses collaborateurs se sont consacrés, à l'Université de Manchester [30] à des études approfondies pour un autre type d'action composée et qui semble prometteur du point de vue économique. Il s'agit de l'action combinée des portiques et des diaphragmes de couverture dans les bâtiments industriels courants à un étage et à toit en pente. Si les éléments de couverture sont convenablement solidarisés entre eux, et assemblés aux portiques, la structure qui se trouve réalisée représente un système hybride tenant de la charpente métallique nue ordinaire et des formes prismatiques (voiles polygonaux) minces. Sous l'action du poids mort, par exemple, les diaphragmes s'opposent à la tendance qu'ont les jarrets des portiques à se déverser, provoquant ainsi une réduction sensible des moments dans le portique. La valeur de cette réduction peut atteindre 60 à 80%, ainsi que l'ont montré les études théoriques et les

essais grandeur réelle exécutés par BRYAN, ainsi que l'analyse, selon une approche différente, et les essais sur modèles réduits de LUTTRELL [26].

La construction mixte acier-béton fait intervenir des panneaux métalliques minces concurremment avec du béton et aussi, parfois, avec des profilés laminés à chaud. Il y a longtemps qu'on a recours aux panneaux métalliques minces (platelage de couverture, etc.) avec les dalles en béton armé, à la fois pour servir de coffrage permanent et comme renforcement aux moments positifs. En raison de la grande variété des formes de panneaux, la documentation expérimentale est généralement fournie par les fabricants de panneaux. Il est urgent de compléter notre information générale sur ce point. Le problème principal est celui de la résistance au cisaillement de la liaison entre le béton et les panneaux relativement souples. En l'absence de déformations particulières des panneaux, la résistance au cisaillement est assurée essentiellement par des liaisons chimiques. Il a été assez clairement établi que l'adhérence chimique du béton est meilleure à l'acier zingué qu'à l'acier nu; d'autres recherches sont toutefois nécessaires sur la réalisation d'une résistance sûre et calculable de l'adhérence de ces cofrages servant d'armature. On a dernièrement développé ce type de construction en prenant en compte l'action composite de dalles mixtes de ce type ou similaires et des poutres métalliques les supportant. Dans ce cas, la transmission des cisaillements entre les poutres et la dalle cellulaire ou nervurée est assurée par les dispositifs usuels, par exemple: des goujons soudés en acier. Des essais [31] ont permis de mettre en lumière le caractère sûr et efficace de ce type de construction mixte, ils mettent particulièrement en évidence que le degré d'interaction obtenu entre la dalle et les poutres dépend de la géométrie des nervures de la dalle en béton qui, elle-même, est conditionnée par la forme des panneaux métalliques minces mis en œuvre.

## 8. Assemblages

La tenue d'ensemble de la plupart des structures à éléments minces d'acier, et plus particulièrement des constructions hybrides dépend largement de la résistance et de la tenue des joints réalisés sur le chantier. Alors que, dans le domaine industriel, l'on dispose d'une vaste expérience de ces assemblages, il semble que ce soit seulement à propos des assemblages boulonnés qu'existe une documentation basée sur des essais systématiques [32]. Il semble nécessaire d'avoir davantage d'informations expérimentales et de standardiser les procédés de mise en œuvre et les moyens de contrôle en ce qui concerne les assemblages boulonnés et, surtout, ceux soudés sur chantier. Le soudage des éléments minces entre eux ou à des éléments de forte section laminés à chaud pose des problèmes assez différents de ceux du soudage des éléments lourds habituels. Des dispositions spéciales doivent être prises pour souder des tôles zinguées. Alors que le soudage par points qui intervient dans la fabrication industrielle des

éléments minces est une technique hautement développée, on constate que le problème, plus difficile, du soudage sur chantier nécessite de nouvelles investigations et améliorations. Il existe maintenant des colles dont l'emploi dans le domaine de la construction est prometteur d'après les essais en laboratoire sur des pièces métalliques minces. Il faut étudier leur comportement et leur tenue en vue d'un éventuel emploi dans la pratique.