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

Band: 6 (1960)

Artikel: Rapport général

Autor: Dubas, Pierre

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-6957

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: 05.02.2026

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

Construction métallique - Stahlbau - Metal Structures

II
Nouveau développement des moyens d'assemblage dans la construction métallique
Neuere Entwicklungen der Verbindungsmittel im Stahlbau
New Developments of Connections in Metal Structures

II a
Soudure
Schweißung
Welding

II b
Boulons précontraints à haute résistance
Hochfeste Schrauben
Prestressed High-Strength Bolts

Rapport général

PIERRE DUBAS
Dr sc. techn., Vevey

a) Soudure

Les recherches relatives à la soudure ont pris, ces dernières années, une telle extension qu'il nous est absolument impossible d'en donner ici un aperçu même sommaire. Nous nous contenterons donc d'examiner les problèmes qui ont été traités dans les six mémoires présentés et qui intéressent spécialement les ingénieurs des ponts et charpentes.

Influence des contraintes longitudinales dans les cordons d'angle

Le premier mémoire de M. FALTUS est une étude avant tout expérimentale sur l'influence des contraintes longitudinales dans les cordons de soudure d'angle, sollicités principalement au cisaillement. On se souvient que ce problème a fait, au Congrès de Lisbonne, l'objet d'une communication de MM. WÄSTLUND et ÖSTLUND.

Les essais décrits par M. FALTUS ont été effectués sur des éprouvettes formées de deux coins réunis par soudure le long de leurs bords, inclinés à 1 : 10. Avec cette disposition, les contraintes longitudinales devraient être pratiquement constantes et les cisaillements, uniformément répartis. Cet essai permettrait donc, en principe, d'éliminer les effets de l'égalisation plastique des tensions de cisaillement et de révéler par là plus clairement l'influence des sollicitations longitudinales du cordon. La dispersion sur les valeurs de la contrainte de comparaison, calculée d'après le critère de HUBER-VON MISES-HENCKY, est certes assez importante, ce qui s'explique facilement si l'on considère que cette théorie se rapporte à la plasticité et non à la rupture; les résultats expérimentaux montrent cependant clairement que les contraintes longitudinales diminuent sensiblement la résistance au cisaillement des cordons d'angle.

Les ruptures fragiles

Il n'est certes pas nécessaire de rappeler ici les ruptures survenues dans certaines constructions soudées, en particulier des ponts, des navires et des conduites forcées. Bien que le nombre des accidents graves soit relativement faible par rapport à celui des ouvrages construits, ces ruptures n'en sont pas moins symptomatiques autant que fâcheuses; elles ont fortement ébranlé la confiance que l'on avait dans la soudure et, par là, retardé indubitablement son extension. L'étude raisonnée de ces accidents a cependant fait progresser la technique, en remettant au premier plan le problème de la fragilité des aciers, capital pour les constructions soudées bien qu'il intervienne également dans les ouvrages rivés. Cette question est traitée dans la seconde communication de M. FALTUS et dans celle de M. RÜHL.

Dans son exposé, M. RÜHL donne un aperçu général des connaissances actuelles dans le domaine de la fragilité; il souligne les importantes lacunes qui subsistent encore et ne pourront être comblées que par des recherches *systématiques*, tant théoriques qu'expérimentales.

On sait que la capacité de déformation d'un acier bien déterminé, d'une microstructure donnée, dépend surtout de l'état de contraintes, de la température et de la vitesse d'application des sollicitations. Si l'on varie l'un de ces facteurs, le travail nécessaire à produire la rupture ne suit généralement pas une loi de variation régulière; les essais, qui ont porté principalement sur l'influence de la température, montrent que ce travail — la résilience — subit une chute brusque, dans une bande de température assez étroite, pour atteindre une valeur très faible. Cette température, dite de transition, sépare le domaine des cassures à grand allongement de celui des cassures fragiles. Quand la vitesse augmente ou que l'état de contraintes devient plus sévère, la température de transition s'élève. Ces propriétés du matériau acier sont connues depuis fort longtemps. Qu'il nous suffise de rappeler ici les travaux de MM. CONSIDÈRE,

LE CHÂTELIER, FRÉMONT, ISOD, CHARPY, etc., dont certains datent du siècle passé.

Les opinions, cependant, divergent quant aux causes profondes de ces phénomènes et aux lois qui les régissent, spécialement en ce qui concerne la relation entre la température critique et l'état de contraintes. Comme le remarque M. RÜHL, l'inconvénient n'est pas très grand en pratique puisqu'il est presque impossible de déterminer en chaque point d'un ouvrage l'état de contraintes total, celui-ci dépendant largement des tensions internes, inaccessibles au calcul.

L'analyse des divers accidents provoqués par les ruptures fragiles prouve, selon M. RÜHL, que le comportement global des ouvrages présente des caractéristiques semblables à celles des essais de résilience. Là aussi, on obtient soit des ruptures fragiles à allongement quasi nul, survenant sans avertissement, soit des ruptures à grand allongement. D'autre part, il existe une température de transition assez bien délimitée entre les deux modes de rupture, comme à l'essai de choc sur barreau entaillé.

Les résultats expérimentaux dans ce domaine sont encore rares et on lira donc avec intérêt le mémoire de M. FALTUS qui se rapporte à l'influence des goussets, soudés aux semelles tendues, sur la fragilité des poutres fléchies. Pour les aciers utilisés dans les essais décrits, la température critique est presque toujours supérieure à $-40°$, quelle que soit la forme adoptée pour les goussets. Cependant, si l'on introduit, dans la région du raccordement, des contraintes internes de compression, grâce à des points de chauffe appropriés, des ruptures par décohésion ne se produisent que pour les goussets sans raccordements progressifs. Ces expériences mettent donc bien en évidence l'influence de l'état de contraintes, dû tant aux tensions internes qu'à l'effet des discontinuités constructives.

Il eût été instructif d'établir, pour chaque type de gousset et chaque sorte d'acier utilisée, le domaine de transition entre les cassures à nerf et les cassures à grain et de comparer ces résultats avec les températures critiques données par les éprouvettes de résilience.

Cet aspect du problème intéresse en effet particulièrement l'ingénieur chargé de fixer la qualité de l'acier à mettre en œuvre dans un ouvrage soudé. Bien entendu il est exclu de ne recourir qu'à des aciers spéciaux, d'une composition et d'une élaboration parfaite, ayant subi des traitements appropriés: les lois élémentaires de l'économie et de la concurrence s'y opposent. On choisira en conséquence, parmi les différentes qualités énumérées dans les normes ou proposées par les aciéries, celle qui présente les garanties nécessaires et suffisantes, compte tenu des conditions données.

Or, à l'heure actuelle, les aciers disponibles sont généralement classés, en ce qui concerne leur tendance à la fragilité, à l'aide des résultats des essais au choc sur éprouvettes entaillées. Deux paramètres principaux entrent en ligne de compte: la température et le genre d'entaille, déterminant pour la sévérité

de la mise en tension tridimensionnelle. On peut donc opérer, soit avec des températures critiques variables et une entaille déterminée, soit avec des entailles de rigueur croissante, à température constante; éventuellement les deux systèmes seront combinés. Pour plus de détails, on consultera, par exemple, les Recommandations élaborées par la Commission IX de l'Institut International de Soudure (document BONHOMME), la norme DIN 17100 ou la norme BS 2762. Remarquons simplement que la notion de température critique ne figure pas explicitement dans ces prescriptions; on s'est contenté de fixer une valeur relativement faible de la résilience, exigée à une température donnée.

Pour choisir la qualité d'acier appropriée, il faudrait évidemment connaître avec certitude la relation entre la tendance à la fragilité de l'ouvrage — ou de l'élément d'ouvrage — soudé, et celle du matériau, caractérisée par les essais sur éprouvettes. Pour ce faire, on peut par exemple, chercher quelle sorte d'éprouvette entaillée donne la même température de transition que l'élément d'ouvrage considéré. C'est le procédé utilisé par M. SCHNADT. Quant à M. RÜHL, il propose de recourir à un seul type d'éprouvette et de classer les éléments d'ouvrage par la différence entre leur température critique et celle des éprouvettes. Dans l'un et l'autre cas, on admet implicitement que la concordance entre l'élément d'ouvrage et l'essai de résilience qui sert à le classer ne dépend pas de la qualité de l'acier, ce qui est loin d'être prouvé.

La véritable difficulté n'est donc pas de classer les aciers, mais bien les éléments d'ouvrage. A notre avis, les bases expérimentales sont encore insuffisantes pour permettre de résoudre le problème. Nos connaissances relatives aux températures de transition des constructions sont en effet très fragmentaires et l'on en est encore à estimer l'influence des facteurs principaux, qui dépendent tant de la conception générale que de la technique de fabrication: l'épaisseur, la disposition et les formes constructives, les déformations à froid lors de la fabrication (vieillissement), les électrodes utilisées, la séquence adoptée pour les soudures (tensions résiduelles) et les soins apportés à leur exécution, le recuit de détente, la valeur des contraintes de service, spécialement des contraintes permanentes, etc. La simple énumération de ces facteurs, pourtant bien incomplète, montre que le problème est complexe et que l'on ne peut guère le réduire à un schéma trop simpliste.

La tendance à la fragilité n'est d'ailleurs pas la seule propriété de l'acier à considérer; les caractéristiques qui exercent une influence sur la disposition à la fissuration, ou à la formation de défauts graves dans le cordon de soudure et sa zone de transition, sont également importantes, puisqu'il faut éviter que l'opération de soudage ne produise des entailles aiguës, qui seraient autant d'amorces possibles de ruptures. Or la fissuration à froid dépend largement de l'aptitude à la trempe du métal et de la ténacité de la zone de transition sous les contraintes multi-axiales. Pour la fissuration à chaud du métal déposé et la formation de pores ou d'inclusions, les propriétés du métal de base jouent

également un rôle. En principe tout au moins, l'examen de la résilience du métal de base devrait dès lors être complété par des essais effectués sur la soudure et la zone de transition. Pour les aciers faiblement carburés et pratiquement non alliés, on peut se dispenser de tels essais pour les ouvrages courants, à condition que l'on connaisse bien le problème et que l'on prenne les précautions nécessaires, par exemple dans le choix des électrodes.

Qualité et contrôles

Dans leurs mémoires, M. Dixon, M. Ch. Dubas et M. Thompson se sont occupés des problèmes que pose l'exécution des ouvrages soudés, et plus spécialement de la question de la qualité et du contrôle nécessaire à son obtention et à son maintien.

Pour réaliser une construction soudée de haute qualité, il faudra d'abord mettre en œuvre un matériau bien adapté. A l'heure actuelle, ce choix sera guidé avant tout par des considérations relatives à la fragilité, problème dont nous venons de parler, en indiquant brièvement les principaux facteurs à considérer. Ajoutons simplement ici que le choix des électrodes joue un rôle important; dans certaines conditions, une électrode de haute qualité permettra de fixer des exigences moins sévères pour l'acier. Nous pensons spécialement aux électrodes basiques, peu sensibles à la fragilité et aux impuretés du métal de base.

C'est en principe lors de la réception aux laminoirs que s'opérera le contrôle des propriétés de l'acier. Cependant, pour les charpentes ordinaires, on renonce souvent à prévoir une véritable recette et les fers parviennent à l'utilisateur sans contrôle d'un organisme indépendant, quelquefois même sans contrôle de l'aciérie. On peut se demander si, par suite de l'importance prise par les problèmes de fragilité en construction soudée, les entreprises de charpente métallique n'en arriveront pas à disposer d'un petit laboratoire d'essais, permettant d'effectuer des analyses chimiques et métallographiques simples, de déterminer les caractéristiques mécaniques des aciers, en particulier les résiliences, et même de s'assurer, par des contrôles aux ultrasons, de l'absence de doublures, malheureusement fréquentes dans les aciers de qualité calmés à l'aluminium. Dans certains pays, quelques entreprises ont déjà adopté cette solution, spécialement celles qui fabriquent aussi de la grosse chaudronnerie. Bien entendu, ce laboratoire s'occupera aussi des contrôles destructifs et non destructifs des soudures, dont nous parlerons par la suite.

Quant au bureau d'études, il devra fixer la conception générale de l'ouvrage et les détails constructifs, en tenant compte non seulement des avantages mais aussi des exigences spécifiques de la soudure. On évitera en particulier tout ce qui peut provoquer des accumulations de tensions; celles-ci diminuent en effet la résistance à la fatigue et augmentent le danger de rupture fragile. On s'efforcera d'assurer une transmission des efforts aussi fluide que possible et de veiller à faciliter les adaptations plastiques.

Lors de l'établissement des dessins, les bureaux d'études devront toujours travailler en étroite collaboration avec les organes d'exécution. Il faut en effet rendre la fabrication aussi aisée que possible, ce qui diminue la probabilité d'obtenir des défauts graves. Souvent il est recommandable et avantageux d'établir un plan de soudage détaillé, tenant compte des propriétés des électrodes utilisées. Ce plan ne peut d'ailleurs être qu'un compromis puisqu'il s'agit de limiter à la fois deux phénomènes antagonistes: les contraintes résiduelles et les déformations de retrait.

La préparation du travail d'atelier s'étendra également à la question des traitements thermiques (préchauffage, recuit) et à l'étude des dispositifs destinés à faciliter la soudure dans des positions aisées (manipulateurs, positionneurs). Comme le remarque M. Dixon, une préparation poussée est toujours indiquée; tout en permettant d'améliorer la qualité, elle conduira souvent à une économie de main-d'œuvre.

La qualité d'une construction soudée dépend naturellement très largement de l'excellence du travail à l'atelier. Tout d'abord, les éléments seront soigneusement préparés. Il n'est peut-être pas nécessaire d'imposer partout le rabotage comme le suggère M. Thompson, mais il n'en reste pas moins que des coupes et des chanfreins réguliers facilitent le travail d'assemblage et de soudure, tout en diminuant le risque d'obtenir des pores.

L'effort principal portera cependant sur la surveillance du travail de soudure proprement dit. Pour cela, un contrôle serré des soudeurs, plutôt que des soudures, est indispensable. Le contrôle commencera pendant l'opération de soudage; il s'étendra au gougeage et à la reprise à l'envers. Remarquons ici que certains détails, peu importants au premier abord, peuvent être en réalité décisifs pour la sécurité; ainsi l'amorçage de l'arc sur la pièce à souder provoque éventuellement une entaille, nuisible quand l'acier est fragile. Ce danger est mis en évidence par l'un des essais de M. Faltus.

L'examen des soudures terminées revêt une importance toute spéciale. Le contrôle portera d'abord sur les dimensions réalisées, qui doivent être conformes aux indications des dessins, et sur l'aspect extérieur de la soudure, très révélateur à un œil exercé. C'est cependant l'examen radiographique (ou gammagraphique), complété éventuellement par un contrôle ultrasonique, qui fournira les renseignements les plus importants. Il permet d'éduquer les soudeurs et d'améliorer leur technique, ce qui se ressentira également dans les ouvrages non vérifiés spécialement.

Les contrôles destructifs sur coupons donnent par contre plutôt des indications sur la qualité de l'acier et du métal d'apport et sur leur compatibilité. Quant aux essais de charge (ou de mise en pression), bien que très recommandables, ils ne révèlent que certains défauts de conception et d'exécution; leur valeur, surtout d'ordre subjectif et psychologique, est donc loin d'être absolue.

Mentionnons pour terminer le contrôle final des dimensions géométriques des pièces terminées, qui montrera avec quelle précision les dessins ont été

respectés. M. THOMPSON traite en détail les précautions à prendre: dressage, déformation préalable des semelles, contreflèches supplémentaires, mise en longueur, etc...

Conclusions

Comme tous les ouvrages de l'ingénieur, les constructions soudées doivent remplir à la fois des conditions de sécurité et d'économie.

Le problème de la sécurité, dans les ouvrages soudés, a deux aspects, puisqu'il est indispensable de se couvrir aussi bien contre le danger de ruptures par décohésion que contre l'apparition de sollicitations trop élevées, pouvant amener la ruine de l'ouvrage.

La question de la fragilité ne peut être résolue que par le choix d'un acier approprié, compte tenu des dispositions constructives adoptées et de l'influence des procédés de fabrication. Remarquons à ce sujet que, souvent, il est pratiquement inutile de réduire, même fortement, les taux de travail; cela conduirait en effet à prévoir des épaisseurs plus fortes, en aggravant ainsi le danger de rupture fragile.

L'autre aspect de la sécurité, celui relatif aux sollicitations dues aux charges extérieures, est plus familier aux ingénieurs, car il est commun à tous les modes de construction. Qu'il s'agisse de la ruine plastique ou de la fatigue, la résistance dépend avant tout des contraintes de service et assez peu, ou pas du tout, des tensions internes. Même en construction soudée, il est donc en principe loisible, une fois résolu le problème de la fragilité, de réduire les exigences du contrôle de fabrication et de tenter de compenser l'effet des défauts possibles en limitant les contraintes admissibles. On voit bien cependant ce qu'un tel procédé a d'aléatoire quant à la sécurité effective de l'ouvrage. Ce procédé est-il au moins *économique?* Nous ne le pensons pas.

Par rapport aux économies réalisées sur la matière première, les frais supplémentaires provoqués par des exigences plus sévères sont en effet relativement modérés, tant pour le coût du contrôle proprement dit (personnel, laboratoire, équipement, films, etc.), que pour l'augmentation éventuelle de la main d'œuvre, due à une diminution du rendement. M. DIXON donne à ce sujet des précisions intéressantes et il rappelle que cette diminution, importante pendant la période d'introduction des nouvelles mesures, devient modeste par la suite. Dans certains cas même, l'adoption d'un contrôle plus strict peut réduire le nombre d'heures de fabrication; en effet, selon M. DIXON, le bureau d'études avait auparavant tendance à prendre trop de précautions en prescrivant, par exemple, des épaisseurs et des longueurs de cordons exagérées. Remarquons enfin que l'amélioration de la qualité se manifestera pour l'ensemble de la production: un atelier soumis à une organisation donnée produit une qualité moyenne déterminée, pratiquement indépendante des pièces sur lesquelles porte effectivement le contrôle.

A notre avis, la qualité paie donc à la longue; l'expérience de nombreux ateliers de fabrication le prouve. Comme le soulignent M. DIXON et M. CH. DUBAS, la différence qui existait, il y a quelques années encore, entre le domaine de la grosse chaudronnerie et celui de la charpente métallique tend à se combler; la haute qualité, exigée par des considérations de sécurité dans le domaine des conduites forcées et des récipients sous pression, a montré aussi ses avantages dans le domaine des ponts et charpentes.

b) Boulons à haute résistance

Il n'y a guère plus d'une dizaine d'années que l'usage des boulons précontraints à haute résistance (boulons *HR*) a commencé à se répandre aux Etats-Unis dans le domaine des ponts et charpentes; en Europe, leur utilisation est encore plus récente. Il s'agit donc d'un mode d'assemblage relativement nouveau et qui figure pour la première fois au programme de nos congrès. Remarquons cependant que les constructeurs de machines emploient depuis longtemps les boulons à serrage intensif pour reprendre des efforts de traction et même, dans certains cas particuliers, des efforts de cisaillement (accouplements préserrés).

En construction métallique également, l'influence favorable de la friction sur le comportement des assemblages était bien connue et l'on pouvait, en principe, envisager des efforts transmis uniquement par frottement, grâce à une précontrainte transversale énergique. Il a fallu néanmoins des années de recherches pour vaincre les difficultés principales: obtenir économiquement un serrage contrôlable et durable, avec une friction aussi élevée que possible.

Le problème semble aujourd'hui en grande partie résolu; des règles d'utilisation ont été établies et les boulons *HR* ont conquis un champ d'applications important et varié. A l'aide des quatre contributions présentées, nous allons tenter de donner un aperçu succint de nos connaissances actuelles, en rappelant les principaux résultats des recherches et les particularités de la mise en œuvre.

Mode d'action des boulons à haute résistance

On n'ignore pas que la tige des rivets correctement posés est soumise, par l'effet du retrait thermique, à des tractions dépassant la limite élastique, ce qui permet de transmettre certains efforts par friction. Le serrage des boulons ordinaires, noirs ou tournés, produit le même effet. Toutefois, comme la limite élastique des rivets et des boulons ordinaires est relativement peu élevée, ces forces de serrage sont modérées; leur valeur effective, d'ailleurs difficilement contrôlable en pratique, varie dans de larges proportions selon les conditions d'exécution; avec le temps, on peut même arriver au desserrage complet de certaines attaches soumises à des efforts dynamiques.

Dans le calcul des assemblages classiques, il serait donc imprudent de tenir compte de la friction; on ne considère que le cisaillement des tiges et la pression latérale, facteurs décisifs dès que le frottement est vaincu.

Dans les assemblages boulonnés *HR*, les rôles sont inversés: les efforts de serrage et de frottement sont primordiaux pour le calcul, et la charge de glissement est la grandeur caractéristique, déterminante pour évaluer la sécurité. La résistance au cisaillement et la pression latérale n'interviennent par contre qu'au moment de la rupture. Pour que les hypothèses de calcul soient satisfaites, il faudra donc mettre en œuvre un préserrage contrôlé et durable, et réaliser un coefficient de frottement déterminé. Nous verrons par la suite comment on s'efforce de remplir ces conditions impératives.

Les boulons *HR* peuvent être également utilisés pour transmettre des efforts de traction agissant parallèlement à leur axe. Ils travaillent alors en principe comme des boulons ordinaires; leur haute résistance et la précontrainte élevée leur confèrent cependant des avantages certains.

Forme et caractéristiques des boulons à haute résistance

Les coefficients de frottement obtenus dans les assemblages par friction étant sensiblement inférieurs à 1, les boulons *HR* devront être fortement précontraints pour être capables de transmettre des efforts égaux ou supérieurs à ceux repris par les rivets ou boulons ordinaires. Comme son nom l'indique, le boulon *HR* présentera donc des caractéristiques mécaniques très élevées. Selon les pays, les dénominations et les prescriptions varient, avec des résistances à la rupture comprises entre 70 kg/mm^2 (B.S. 1083, R 45/55) et 120 kg/mm^2 (DIN 267,12 K) et des limites élastiques comprises entre 53 et 108 kg/mm^2. Il est naturellement tentant d'utiliser des boulons à très haute résistance, mais il ne faut pas oublier que leur allongement à la rupture est réduit, ce qui peut conduire à certaines difficultés lors de la pose.

Extérieurement, un boulon *HR* ne se distingue guère d'un boulon ordinaire. Le rayon du congé de raccordement entre le fût et la tête a cependant été augmenté, l'expérience ayant montré qu'il s'agissait d'un point faible. D'autre part, le boulon est toujours utilisé avec deux rondelles, l'une sous la tête, l'autre sous l'écrou. Ces rondelles sont en acier dur et elles répartissent sur les pièces à assembler les efforts de serrage, prévenant ainsi des déformations plastiques trop grandes, qui causeraient avec le temps une réduction sensible de la précontrainte. Des précautions spéciales pour empêcher le desserrage des écrous ne sont pas nécessaires. Quant aux trous, leur diamètre peut être sans danger supérieur à celui du fût puisque le boulon ne travaille normalement ni au cisaillement, ni à la pression latérale; le jeu vaut généralement 1 à 1½ mm, ce qui facilite le perçage et permet éventuellement de supprimer l'alésage au montage.

Recherches relatives aux efforts de serrage et de friction

La mise au point du nouveau moyen d'assemblage par friction a nécessité des essais nombreux et des études poussées. Commencées et poursuivies pendant de longues années aux Etats-Unis, ces recherches ont été également développées en Europe, spécialement en Allemagne. Les mémoires de M. BERRIDGE, de MM. WRIGHT et LEWIS et de M. STEINHARDT en donnent l'historique et nous nous contenterons de résumer les principaux résultats expérimentaux. Nous parlerons d'abord des essais relatifs aux efforts de serrage et de friction.

Le premier problème qui se pose est celui de *mesurer l'effort de précontrainte* appliqué. Pour ce faire, on a cherché la relation qui lie le couple de torsion M_t exercé sur l'écrou, relativement facile à déterminer, à l'effort de serrage P engendré dans la tige. Cette formule s'écrit:

$$M_t = k \times d \times P,$$

d désignant le diamètre nominal du boulon et k, un coefficient sans dimensions. Ce coefficient dépend à la fois du filetage et des conditions des frottements internes, c'est-à-dire des matériaux, de l'état de surface, du degré de lubrification, et même de la forme des filets et du procédé de fabrication, ainsi qu'il ressort du mémoire de M. BERRIDGE. Pour des boulons convenablement graissés d'un type déterminé, la dispersion des valeurs expérimentales de k est cependant acceptable, de l'ordre de 5 à 10%. Comme la mesure du moment appliqué est elle-même affectée d'une erreur, pouvant atteindre 10%, la précontrainte effective ne sera pas connue très exactement, d'où une certaine insécurité. Il existe bien des dispositifs de contrôle qui permettent de calibrer les clefs utilisées en mesurant les tensions d'un boulon étalon, ce qui supprime une partie des causes d'erreur. Cependant il serait utile de disposer d'un appareil simple permettant la mesure directe et précise de l'effort de serrage effectif des boulons posés.

On peut d'ailleurs éluder la difficulté en substituant à la mesure précise de l'effort une évaluation grossière de l'allongement; c'est le principe de la méthode dite «part-torque part-turn» citée par M. BERRIDGE et par MM. WRIGHT et LEWIS. Le boulon est serré d'abord à fond à la main, c'est-à-dire à une valeur comprise entre ¼ et ¾ de l'effort nominal. On tourne ensuite l'écrou de ½ à 1 tour, à l'aide d'une clef pneumatique, ce qui introduit dans la tige des tensions supérieures à la limite élastique conventionnelle (0,2%). A cause du comportement plastique de l'acier, ces tensions dépendent assez peu de la précontrainte initiale du boulon serré à la main, comme cela ressort du diagramme figurant dans le mémoire de MM. WRIGHT et LEWIS. Pour provoquer la rupture, il faudrait encore donner 1 à 2 tours supplémentaires d'écrou; la marge contre les imprécisions de montage paraît donc suffisante.

Cette méthode de serrage au «tour d'écrou» est utilisée surtout dans les

pays anglo-saxons; elle est séduisante au premier abord puisqu'elle permet d'obtenir des préserrages énergiques et relativement précis sans un équipement coûteux. Une précontrainte dépassant la limite élastique pourrait cependant exercer une influence fâcheuse sur la sécurité de l'assemblage. Il est vrai que les rivets posés à chaud sont sollicités de la même façon, mais ils sont plus doux que les boulons *HR* et possèdent une réserve plastique bien supérieure. Quant aux effets de la relaxation, il est improbable qu'ils ne se manifestent pas dangereusement à la longue. Comme le remarquent MM. WRIGHT et LEWIS, la prudence paraît surtout s'imposer pour les assemblages sollicités par des efforts agissant parallèlement à l'axe des boulons.

Des recherches plus poussées semblent donc nécessaires pour élucider la question de la précontrainte admissible dans les boulons *HR*, en tenant compte de l'influence de la relaxation ou du fluage.

L'effort que peut transmettre un boulon *HR* dépend non seulement de la valeur du préserrage mais encore du *coefficient de frottement* des surfaces en contact. Aux Etats-Unis on n'avait, au début, pas approfondi cet aspect du problème. Le but des essais était en effet bien délimité: déterminer dans quelles conditions un rivet peut être remplacé par un boulon *HR* correspondant. Comme les contraintes de cisaillement admissibles dans les rivets sont peu élevées aux Etats-Unis, un coefficient de frottement de 0,25 à 0,30 est suffisant, pourvu que la précontrainte s'élève à environ 5 t/cm^2. Des frictions de cet ordre sont atteintes sans difficulté si les surfaces sont propres, exemptes d'huile, de peinture, etc...

En Allemagne, par contre, on a accordé d'emblée une attention spéciale à la question du frottement et on a cherché à améliorer le coefficient de friction par un traitement approprié. Comme l'indique M. STEINHARDT, c'est le décapage au jet de sable ou au chalumeau qui a donné les meilleurs résultats, soit un coefficient minimum de 0,45 pour l'acier doux 37 et de 0,60 pour l'acier 52. Pour l'acier doux, ces valeurs sont corroborées par les essais entrepris dans d'autres pays.

Recherches relatives à la résistance des assemblages

Nous considérerons tout d'abord les assemblages où les efforts agissent *perpendiculairement à l'axe des boulons* et sont transmis par friction, pratiquement sans aucun déplacement relatif des surfaces en contact. L'assemblage est donc très rigide et la répartition des efforts sur les différents boulons sera loin d'être uniforme: les boulons extrêmes reprendront pratiquement toute la force et les autres seront inopérants. Lorsque la charge de glissement du premier boulon sera dépassée, le second commencera à agir efficacement et ainsi de suite, jusqu'au moment où l'effort appliqué égalera la somme des frictions des boulons. L'ensemble de l'assemblage se mettra alors en mouvement pour ne s'arrêter que lorsque les boulons seront venus en contact avec les bords des

trous: on aura atteint la charge de glissement critique, grandeur caractéristique de l'assemblage par friction. Pour un effort supérieur, le mode d'action des boulons *HR* commencera à se rapprocher de celui des rivets et boulons ordinaires, et la rupture *statique* sera en principe semblable à celle des assemblages classiques; en particulier, la charge de rupture, en général bien supérieure à celle de glissement, ne dépendra pratiquement ni du préserrage initial ni de l'état des surfaces en contact.

On sait que la résistance des éléments d'ouvrage soumis à la *fatigue* est fonction de la concentration inévitable des contraintes au droit des discontinuités, trous et entailles de toutes sortes. Les assemblages à haute résistance transmettent les efforts par frottement des surfaces, ce qui réduit considérablement les pointes de tensions. Leur résistance à la fatigue sera donc supérieure à celle des éprouvettes forées et des assemblages rivés. Dans la plupart des essais, les ruptures se sont produites dans la section non déforcée.

Comme nous l'avons signalé, la répartition longitudinale des efforts dans un assemblage très rigide — tel celui à friction — est caractérisée par une concentration aux extrémités de l'assemblage. Pour des sollicitations dynamiques, on peut se demander si une égalisation des efforts des boulons par petits glissements relatifs se produit comme dans les attaches soumises à une sollicitation statique. L'influence de ces glissements sur la valeur de la friction serait d'ailleurs à étudier puisque des essais récents effectués en Allemagne de l'Est montrent une forte diminution des frottements lorsque les pièces assemblées ont déjà subi une série de glissements. Il conviendrait également d'étendre les recherches au domaine, très important pour la pratique, des sollicitations répétées en nombre modéré, jusqu'à obtenir le raccordement avec les essais statiques.

Quant aux assemblages soumis à des efforts agissant *parallèlement à l'axe des boulons*, ils sont encore assez mal connus. Par suite de la précontrainte, les forces extérieures de traction ne provoquent qu'une faible augmentation de la tension des boulons tant que l'assemblage ne décolle pas. Il en résulte une diminution importante des déformations de l'attache et une augmentation appréciable de la résistance à la fatigue. Les recherches dans ce domaine sont activement poussées et l'on obtiendra certainement sous peu des résultats intéressants.

Prescriptions

Nous remarquerons simplement ici que les règles américaines actuelles, comme les essais qui ont permis de les établir, se rapportent au remplacement des rivets par des boulons *HR*, tandis que les normes allemandes considèrent les boulons *HR* comme un moyen d'assemblage foncièrement nouveau. Cette manière de voir nous semble plus indiquée et elle est en train de s'imposer également aux Etats-Unis.

C'est donc par rapport à la charge de glissement que l'on déterminera la

sécurité de l'assemblage. Pour les éléments soumis à des sollicitations statiques, on pourra toutefois tenir compte de la marge de résistance jusqu'à la rupture. Il ne faut cependant pas oublier que les glissements des assemblages *HR* sont importants, à cause du jeu dans les trous, et que les déformations d'ensemble des ouvrages que ces déplacements peuvent provoquer sont inacceptables en certains cas.

Mise en œuvre et équipement

Pour satisfaire aux hypothèses de calcul, il est indispensable que les forces de friction admises soient effectivement atteintes; l'effort de serrage et le coefficient de frottement devront donc être contrôlés soigneusement lors du montage.

Pour obtenir une précontrainte déterminée, on peut, comme nous l'avons indiqué, mesurer le moment de serrage ou tourner l'écrou d'un certain angle. Le premier procédé a été utilisé dès le début; il est encore très répandu et c'est même le seul autorisé en Europe continentale. Dans son mémoire, M. BERRIDGE décrit en détail les différents types de clefs employées, dynamométriques ou à air comprimé. Mentionnons également les boulons nouveaux à «autoréaction»: la réaction du moment de serrage appliqué à l'écrou est transmise à une prolongation de la tige du boulon, ce qui décharge l'opérateur. En prévoyant une rainure calibrée entre la tige et sa prolongation, on crée une section déforcée qui rompt en torsion dès que l'on atteint un moment déterminé, dépendant de la résistance effective du boulon; le contrôle se fait donc par le boulon lui-même, qui porte le nom de «Torshear».

Comme l'indique M. STEINHARDT, la valeur du coefficient de frottement est également mesurable au chantier.

L'ordre dans lequel on serre les boulons doit être déterminé avec soin. Sans cela, les boulons mis d'abord en précontrainte pourraient ne plus avoir à la fin l'effort de serrage désiré.

Applications des boulons à haute résistance

Le mémoire de M. BERRIDGE, qui décrit les nombreuses utilisations de boulons *HR* sur le réseau des «British Railways», montre bien la variété des applications possibles.

C'est à un mode d'emploi spécial qu'est consacré le mémoire de M. SATTLER. Il s'agit de la liaison de la poutre en acier à la dalle en béton dans les ouvrages mixtes. Les essais décrits par M. SATTLER indiquent que, moyennant certaines précautions, il est possible de remplacer les chevilles, toujours dispendieuses, par des boulons *HR* serrant vigoureusement la dalle contre la membrure. Les efforts sont transmis par frottement, avec un coefficient de l'ordre de 0,45. La charge de rupture statique est bien supérieure à celle provoquant le début du glissement. Des essais complémentaires seront nécessaires pour déterminer le comportement à la fatigue de ces liaisons.

Comme chaque dispositif d'assemblage, les boulons *HR* ont leurs particularités qui influencent considérablement la conception des attaches et même des ouvrages. Il se dessine une évolution un peu semblable à celle des constructions soudées, bien que plus limitée, et qui donnera à l'assemblage *HR* ses formes spécifiques propres, différentes de la rivure. En particulier, la rigidité très grande des assemblages par friction et la concentration des efforts aux extrémités qui en résulte obligent à prévoir des attaches aussi courtes que possible; on essayera également d'améliorer la répartition longitudinale, par exemple en étudiant spécialement la forme des goussets ou en reprenant le poids propre par les boulons intérieurs seuls.

Parlons encore pour terminer des avantages économiques que l'on peut retirer de l'emploi des boulons *HR*. Actuellement, les boulons, en eux-mêmes, sont plus chers que les rivets. Cependant la préparation plus simple en atelier des éléments de l'attache et surtout la pose au montage plus rapide et moins bruyante, avec une équipe réduite et un outillage modéré, permettent de compenser plus ou moins largement la différence. Ainsi, dans les pays à salaires élevés, comme les Etats-Unis, les rivets de montage ont presque complètement disparu. Par ailleurs, si paradoxal que cela puisse paraître, le développement de la soudure, en provoquant une pénurie de riveurs qualifiés, a favorisé l'extension des boulons *HR*.

Conclusions

Avec le boulon *HR*, le constructeur dispose d'un nouveau mode d'assemblage, aux caractéristiques très intéressantes. Nous en avons rappelé brièvement les avantages techniques et économiques, tout en soulignant les lacunes de nos connaissances et les difficultés inhérentes à une mise en œuvre correcte.

A notre avis, une certaine prudence s'impose encore dans l'emploi des boulons *HR*; il n'est en effet pas exclu que les efforts de serrage (relaxation), et même les coefficients de frottement, ne varient plus fortement avec le temps que ne le laissent supposer les résultats des essais de relativement courte durée acquis actuellement. Ce problème est de la plus haute importance pour les assemblages sollicités à la fatigue, dont la marge de résistance entre le glissement et la rupture est très faible.