

Réflexions sur une doctrine générale de calcul des constructions métalliques

Autor(en): **Massonnet, Ch. / Save, M.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **7 (1964)**

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-7942>

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.

**Réflexions sur une doctrine générale de calcul des
constructions métalliques**

*Betrachtungen über allgemeine Grundsätze für die Bemessung von
Stahlkonstruktionen*

Some Remarks on the General Principles of the Design of Steel Structures

CH. MASSONNET

Professeur à l'Université de Liège

M. SAVE

Chargé de Cours à la Faculté Polytechnique
de Mons

Les constructions métalliques doivent être dimensionnées de manière à présenter un comportement correct en service et à offrir une sécurité fixée à l'avance vis-à-vis de la ruine réelle. On examine successivement ci-après comment ce principe fondamental peut être appliqué à l'analyse d'une structure donnée, puis au dimensionnement d'une structure.

1. Analyse d'une structure donnée

1.1. Comportement correct en service

Dans les conditions de service, c'est-à-dire de *charges*, température, etc... prévues en service, la structure doit pouvoir remplir correctement sa *fonction*; cela impose le plus souvent des limitations aux *déformations* (soit statiques: flèches de poutres ou de planchers, soit dynamiques [vibrations]). Ces conditions de déformation doivent être vérifiées en faisant appel à la méthode de calcul valable dans les conditions de service (le plus souvent la Résistance des Matériaux en domaine élastique, avec utilisation de données empiriques permettant d'estimer des effets échappant au calcul direct: effets des tensions résiduelles, de la déformabilité des assemblages, des déformations plastiques localisées, etc...). On passe ainsi par l'état de tension pour obtenir les déformations, mais il n'est en général pas rationnel de vérifier une «résistance en service» (méthode des tensions admissibles) car les conditions de ruine sont en général des conditions plus sévères que celles de service.

1.2. Sécurité fixée d'avance vis-à-vis de la ruine

Il faut se fixer d'une part les *caractéristiques mécaniques* et d'autre part les *sollicitations* puis ensuite analyser le processus de ruine.

1.2.1. Caractéristiques mécaniques

Sur la base d'essais statistiques exécutés dans des conditions aussi proches que possible des conditions réelles, on dispose des valeurs moyennes des *caractéristiques mécaniques*: R_e , R_r , A , S , E , G , ainsi que des dimensions des éléments, etc. que l'on doit affecter de coefficients de *minoration* liés à la dispersion de chaque caractéristique par rapport à la moyenne.

Ceci donne les *valeurs caractéristiques* (utilisées par exemple par le C.E.B. dans sa doctrine sur la sécurité des structures en béton armé).

Les valeurs des caractéristiques à mettre en œuvre dans les calculs (valeur *de calcul*) doivent, elles-même, être minorées par rapport aux valeurs caractéristiques en tenant compte:

1. de la possibilité d'écart entre les caractéristiques des métaux prélevés et des métaux les plus faibles mis en œuvre;
2. de la possibilité de corrosion (bateaux par exemple), d'usure mécanique (rails par exemple);
3. des conditions de réalisation (main d'œuvre non qualifiée en pays sous-développé par exemple).

1.2.2. Les sollicitations de ruine seront, soit:

a) celles de service, appliquées cycliquement n fois, avec $n \geq n_s$, n_s étant le nombre de cycles correspondant au service demandé à la structure;

b) les sollicitations de service affectées de coefficients de *majoration* basés eux aussi sur des concepts probabilistes: les coefficients de majoration seront d'autant plus grands que sera grande la probabilité de voir, pendant la vie estimée de la structure, les charges en question dépasser leurs valeurs de service, et d'autant plus que la borne supérieure du dépassement sera haute et mal connue. Il est clair, en particulier, que les surcharges seront affectées de coefficients de majoration importants, tandis que le coefficient de majoration des charges mortes sera de l'ordre de 1,10.

Enfin, on peut accentuer tous ou certains de ces coefficients de minoration et majoration (de façon uniforme ou non) pour tenir compte de l'importance humaine et économique d'une ruine éventuelle de la structure.

Des concepts statistiques analogues à ceux repris ci-dessus, et le fractionnement du «coefficient de sécurité», ont déjà été adoptés par le C.E.B., sont en cours d'examen à la Convention européenne de la construction métallique, et figurent dans les codes des pays d'Europe orientale (théorie des sollicitations limites).

1.2.3. Analyse du processus de ruine

1.2.3.1. *Généralités*. Il faut maintenant vérifier que la structure faite des matériaux aux caractéristiques ainsi minorées et soumise aux sollicitations de ruine (sollicitations de service majorées), n'a pas encore atteint ou au plus a juste atteint la ruine.

Il faut pour cela faire appel à nos connaissances en *mécanique des solides* pour déterminer le ou les processus de ruine possible de la structure.

Cette ruine peut survenir par :

1. excès de déformation permanente, avec ou sans formation de mécanisme, avec ou sans instabilité, avec ou sans fluage.
2. par rupture, soit suite à une instabilité locale ou globale, soit de fatigue, plastique ou non, soit fragile.

Il faudra donc, selon les cas, avoir recours à :

- la Résistance des Matériaux en régime élastique (ou à l'élasticité) complétée par diverses données expérimentales (facteur de réduction d'entaille k_f en fatigue, imperfections maxima à craindre dans le cas des pièces en danger d'instabilité [2], conditions produisant la ruine par *fatigue*, etc...);
- la théorie de la plasticité, ou plus souvent l'*analyse limite* (méthode des rotules plastiques pour les charpentes);
- la visco-élasticité.

Les deux éléments dont dépend le processus de ruine sont :

1. le comportement mécanique du matériau (connaissance des matériaux);
2. la variabilité des charges de ruine dans le temps.

1.2.3.2. Si les charges de ruine sont *statiques* et ne sont susceptibles de se présenter qu'*une* fois (surpression dans un réacteur nucléaire ou dans un réservoir, surcharge accidentelle d'une ossature) la ruine a lieu par excès de déformation plastique et l'analyse limite plastique doit être utilisée. Dans l'état actuel des connaissances sur la rupture fragile, il n'est encore possible que de prescrire des règles destinées à éviter l'*exhaustion de la ductilité*, et non de prédéterminer quand la rupture sera fragile et sous quelles sollicitations elle se produira.

Notons que l'instabilité élastique ou élasto-plastique est incluse dans l'analyse limite considérée ci-dessus et qu'il reste certainement à perfectionner nos connaissances dans ce domaine [3].

1.2.3.3. Si les charges de ruine sont statiques et appliquées de manière permanente (donc identiques aux charges de service), la ruine peut avoir lieu par *fluage* (ex. : réservoirs sous pression à haute température).

Il faut alors utiliser la théorie du fluage (visco-élasticité) — compte tenu des tensions thermiques existantes — pour déterminer le temps de vie réel et le comparer au temps de vie prescrit¹⁾.

¹⁾ Le fluage a pour résultat de modifier de manière permanente les dimensions de la structure et de modifier la répartition des tensions données par la théorie de l'élasticité, tensions thermiques comprises. Il faut alors examiner la situation qui se présente après arrêt — et donc refroidissement — de l'installation, car des ruptures se produisent fréquemment à ce moment.

1.2.3.4. Si les charges de ruine sont appliquées cycliquement, et si le nombre n de cycles est tel que $\frac{1}{4} \leq n \leq 25.000$, le mode de ruine pourra être la *fatigue plastique* (high strain fatigue).

Quand la structure présente des concentrations de tension (état de tension fortement non homogène), la fissure de fatigue plastique se produit à partir de ces zones qui sont en état de déformation plastique limitée (restricted plastic flow) et sont par conséquent soumises à des cycles à *déformation totale constante* imposée par la partie environnante, qui est en régime élastique. On peut alors déterminer la vie de la structure à l'aide de la méthode proposée par LANGER [4]. Celle-ci est analogue aux méthodes de calcul à la fatigue à grand nombre de cycles ($n > 25.000$ et souvent de l'ordre de 10^7). On utilise une courbe d'endurance liant σ , amplitude fictive élastique nominale des tensions, aux nombres de cycles n . On tient compte de l'influence plus ou moins grande de la tension moyenne et l'on applique des coefficients *expérimentaux* k_f d'entaille à la fatigue.

Quand la structure est soumise à des cycles à amplitude de *tension* fixée (par exemple structure isostatique chargée par poids), les recherches de RODERICK et RAWLINGS [9] ainsi que des essais (non publiés) de traction répétée effectués au Laboratoire de résistance des matériaux de l'Université de Liège montrent qu'on peut avoir *ruine par accumulation de déformations* permanentes de même signe, la déformation totale variant dans le temps comme une déformation du fluage, ou bien *ruine par exhaustion de ductilité* provenant de déformations plastiques successives de signes contraires. Dans ce dernier cas, il faudrait connaître, d'après le type de cycle de charge imposé à la structure, le nombre de cycles amenant cette exhaustion.

Si la structure est hyperstatique, on peut utiliser la théorie plastique de *l'instabilité de déformation* [5] qui montre que la structure périra, soit par accumulation de déformations cycliques de même sens (incremental collapse), soit par plasticité alternée épuisant la ductilité du matériau. Dans le premier cas, on doit se prémunir par un critère de flèche; dans le second, par un critère de rupture.

Cependant, cette théorie devrait être réexaminée à la lumière des résultats expérimentaux récents sur le comportement des métaux soumis à des cycles de tension entre limites fixes.

1.2.3.5. Enfin, si l'on est en présence de *fatigue* au sens habituel ($n \gg 25.000$) on appliquera les méthodes de calcul adéquates, dont le point de départ est une étude de la structure par la résistance des matériaux en domaine élastique²⁾.

²⁾ Il est cependant permis de faire subir à la structure une opération de précontrainte par déformation plastique initiale, de façon à y engendrer une répartition de tensions résiduelles qui amélioreront son comportement en service ultérieur. Des exemples de telles opérations sont:

1.2.3.6. Il nous semble *en résumé* qu'il n'est pas raisonnable d'opposer des méthodes qui se complètent, mais qu'il faut plutôt s'efforcer de les unir dans un corps de doctrine plus vaste, et que d'autre part il faut étudier les phénomènes à l'aide des méthodes adéquates et non à l'aide d'une méthode connue (élasticité) mais inadéquate et que l'on doit forcément violenter.

2. Dimensionnement d'une structure

Lorsque la structure n'est pas donnée mais qu'on doit la dimensionner, les différentes méthodes (élastique, plastique, visco-élastique) peuvent venir en opposition. En fait, ce qui est en opposition ce sont *les critères principaux de dimensionnement choisis*. On peut en effet librement décider, sur la base d'arguments à faire valoir, que le dimensionnement doit être principalement basé soit sur les conditions de service, soit sur les conditions de ruine.

La méthode à utiliser découle alors nécessairement de ce choix, car des choix différents entraînent des méthodes différentes.

Si ce dimensionnement était doublé d'une vérification dans les conditions non utilisées pour le dimensionnement, il resterait peu d'oppositions. Mais chaque méthode (élastique, plastique) se veut seule nécessaire, point de vue soutenu par les praticiens qui ne veulent faire qu'*un* calcul et pas deux (dimensionnement plus vérification).

On est ainsi conduit à affubler chacune des méthodes de corrections ou de stipulations supplémentaires destinées à éviter la vérification subséquente, tout en satisfaisant au second type de conditions. C'est ainsi que divers règlements sur le calcul des bâtiments, basés sur la méthode élastique, autorisent des réductions des moments fléchissants sur les appuis intérieurs des poutres continues.

Inversement des règlements basés sur le dimensionnement plastique imposent des conditions supplémentaires destinées à assurer la serviciabilité.

Une telle façon de faire peut se justifier du point de vue pratique, si l'on dispose d'assez d'informations pour édicter des règles supplémentaires assez sûres et d'un champ d'application suffisamment étendu³⁾.

L'autofrettage des tubes de canons et des réservoirs cylindriques destinés à supporter de hautes pressions.

La déformation préalable «à bloc» des gros ressorts hélicoïdaux employés dans la suspension des véhicules et des ressorts à lame.

La précontrainte de certaines pièces entaillées sollicitées par fatigue.

³⁾ La tendance générale actuelle est, cependant, de s'efforcer de concilier les différents critères. C'est ainsi que, dans les ouvrages en béton précontraint, il est usuel à la fois de faire un calcul élastique, de calculer la sécurité vis-à-vis de la fissuration, et enfin d'évaluer la sécurité vis-à-vis de la rupture. Une tendance analogue se remarque dans les études récentes sur le béton armé [7].

Le choix du critère principal n'est d'ailleurs pas toujours libre, comme on peut le voir en examinant les méthodes usuelles de calcul des assemblages.

Dans le cas des assemblages *rivés*, la méthode usuellement employée est indiscutablement une méthode *plastique* (emploi du concept de section nette, égalisation des efforts repris par des rivets en file, etc...).

Dans les assemblages *soudés*, il existe des tensions résiduelles égales à la limite élastique du métal. Donc, le dimensionnement plastique lui-même est impossible et il faut se baser directement sur les conditions de rupture.

Enfin, dans les assemblages à boulons à haute résistance, on table actuellement en Europe sur le frottement, c'est-à-dire qu'on adopte un dimensionnement *élastique*.

Le choix d'une méthode de dimensionnement élastique, tenant compte de toutes les surtensions effectives en service, serait terriblement dispendieuse dans le cas des charpentes rivées et simplement *impossible* dans le cas des charpentes soudées.

Quoi qu'il en soit, *le choix fondamental est celui du critère principal de dimensionnement*, parce qu'il conditionne toute l'économie de la structure. Divers éléments peuvent entrer dans ce choix, mais il semble en tout cas rationnel de préférer une méthode qui, toutes autres choses égales d'ailleurs, permette d'*optimiser* le dimensionnement. Comme illustrations de cette possibilité, citons le dimensionnement plastique où il est possible de faire un dimensionnement *direct*, conduisant au poids minimum de métal, ce qui n'est pas possible en dimensionnement élastique [5].

A côté du procédé empirique qui consiste à rechercher les stipulations complémentaires à une méthode pour la rendre susceptible de satisfaire à la fois aux conditions de service et de ruine, une autre voie (plus étroite sans aucun doute) consiste à rechercher des méthodes rationnelles de dimensionnement qui satisfont *automatiquement* aux deux types de conditions. Dans le cas de charges statiques et de ruine par mécanisme plastique, il existe une possibilité théorique dans cette voie: on peut montrer en effet [6] qu'un dimensionnement élastique d'égale résistance vis-à-vis de la plastification est aussi, pour un métal obéissant à la condition de plasticité de VON MISES, un dimensionnement plastique de poids minimum.

3. Conclusions

Nous pensons que, s'ils veulent progresser, les ingénieurs constructeurs doivent non pas s'accrocher à *une* méthode familière dans laquelle ils ont été formés et l'opposer aux autres, mais plutôt s'efforcer d'être capables d'appliquer *toutes* nos connaissances actuelles en mécanique des solides à la construction. Ces connaissances expérimentales et théoriques, ont fortement progressé ces dernières années et continuent à se développer rapidement.

Il semble que le moment soit venu d'essayer de jeter les bases d'une doctrine rationnelle les utilisant de façon synthétique. Il reste évidemment énormément à faire (quand faut-il commencer à considérer qu'il y a fatigue plastique et non chargement statique? Que sait-on du fluage avec fatigue en construction mécanique, que sait-on de l'interaction ossature-murs et planchers d'une ossature du point de vue de la ruine par mécanisme ou du flambement en masse, etc...)? Cependant, on peut s'efforcer dès à présent de tracer clairement les axes à suivre, ce qui permettra d'organiser les recherches de la façon la plus efficace et ainsi de faire progresser plus rapidement la science du constructeur.

Bibliographie

1. A. MOREIRA DA ROCHA: «Le dimensionnement idéal des ponts en grille de béton armé». 7e Congrès de l'A.I.P.C., Publ. Préliminaire, pp. 221—230, 1964.
2. J. DUTHEIL: «L'évolution de la notion de sécurité en constructions métalliques». 7e Congrès de l'A.I.P.C., Publ. Préliminaire, pp. 193—204, 1964.
3. A. HRENNIKOFF: "Plastic and Elastic designs compared". 7e Congrès de l'A.I.P.C., Publ. Préliminaire, pp. 205—212, 1964.
4. B. F. LANGER: *Welding Jl. Res. Suppl.* Vol. 37, p. 411 S, Sept. 1958 et *Journal of Basic Engineering*, A.S.M.E., pp. 389 à 402, Sept. 1962.
5. CH. MASSONNET et M. SAVE: «Calcul Plastique des Constructions», Vol. 1: Ossatures planes, éditeur C.B.L.I.A., Bruxelles 1959.
6. CH. MASSONNET et M. SAVE: «Calcul Plastique des Constructions», Vol. II, Structures spatiales, éditeur C.B.L.I.A., Bruxelles 1962.
7. V. PETCU: «Une conception nouvelle dans le calcul plastique des structures en béton armé». Acad. Rép. Populaire Roumaine. Etudes et Recherches de Mécanique Appliquée N° 6, Année 14, 1963.
8. W. PRAGER: «Problèmes de plasticité théorique». Dunod, Paris, 1958.
9. J. W. RODERICK et B. RAWLINGS: 7e Congrès de l'A.I.P.C., Publ. Préliminaire, pp. 525—536, 1964.

Résumé

Les constructions métalliques doivent être dimensionnées de manière à présenter un comportement correct en service et à offrir une sécurité fixée à l'avance vis-à-vis de la ruine. Tandis que le comportement en service est élastique, l'analyse du comportement à la ruine fait intervenir des connaissances nouvelles acquises dans les domaines de la plasticité et de la viscoélasticité. La doctrine générale de calcul des constructions doit utiliser l'ensemble de ces connaissances de façon synthétique.

Zusammenfassung

Stahlkonstruktionen sollen so bemessen werden, daß sie sich unter Betriebsbedingungen befriedigend verhalten und eine im voraus festgesetzte Bruch-

sicherheit aufweisen. Unter Betriebsbedingungen ist das Verhalten elastisch; für die Traglastuntersuchung sind dagegen die neueren Erkenntnisse auf dem Gebiet der Plastizität und der Viskoelastizität zu berücksichtigen. Allgemeine Grundsätze für die Bemessung der Tragwerke müssen sich auf eine Synthese aller dieser Kenntnisse stützen.

Summary

Steel structures must be so designed that they exhibit satisfactory behaviour in service and provide a margin of safety fixed in advance as regards actual failure. Whereas the behaviour in service is elastic, the analysis of the behaviour to failure introduces new facts acquired in the fields of plasticity and viscoelasticity. The general principles of design for these structures must make use of all these facts in combination.