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

**Band:** 8 (1968)

**Artikel:** Optimisations des structures

**Autor:** Courbon, J.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-8692

**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:** 02.07.2025

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

# Ic

## Optimisation des structures

J. COURBON
Prof., Paris

A notre avis, l'optimisation d'une structure consiste à concevoir et à réaliser cette structure au moindre prix, en vue d'un service bien défini. En particulier le coefficient de sécurité de la structure doit être imposé. Ce point soulève déjà bien des difficultés pour comparer les différents projets d'une même structure utilisant des matériaux dont les qualités sont très différentes. Dans l'évaluation du prix, il faut bien entendu faire intervenir la durée de vie de la structure, son entretien, et la possibilité de son adaptation aux modifications prévisibles du service demandé. Ces modifications résultent, par exemple, de l'augmentation de poids et de vitesse des surcharges pour les ponts, de l'augmentation du poids des avions pour les pistes, de l'accroissement du tonnage des navires pour les ouvrages portuaires.

Le prix de la structure dépend de très nombreux paramètres. Certains sont connus et constituent des données imposées à l'Ingénieur. D'autres, variables, doivent être choisis de façon à rendre le prix de la structure minimum.

Parmi les données imposées, on peut distinguer

A. Les données *générales*. Ce sont:

A1. Les qualités et les prix des matériaux disponibles au moment de la construction de la structure.

A2. L'état des connaissances concernant le comportement mécanique et physique de ces matériaux, se traduisant par des critères de sécurité et des modèles mathématiques permettant le calcul a priori des structures.

B. Les données *particulières* à la structure étudiée. Ce sont:

B1. Les données géométriques, en particulier les dimensions imposées à la structure. Tels sont, par exemple, les gabarits à réserver sous un pont tant durant sa construction qu'en situation définitive.

B2. Les sollicitations, mécaniques et autres que mécaniques (température par exemple). Il faut distinguer les sollicitations provoquées par un système de forces extérieures données non équivalent à zéro, et les sollicitations qui conduisent à un état de coaction.

B3. Les données géographiques impliquant en particulier le prix des transports et de la main-d'œuvre, et la qualité du sol de fondation.

B4. Le délai de construction – S'il n'est pas respecté, il faut tenir compte des intérêts intercalaires et évaluer le dommage causé par le retard dans la mise en service.

B5. Eventuellement l'esthétique de la structure.

Les paramètres variables laissés au choix de l'Ingénieur sont essentiellement:

C1. Le choix des matériaux: pierre, bois, acier, béton, béton armé, béton précontraint, etc.

C2. Le choix de la structure.

C3. Le mode de réalisation de la structure comprenant le problème fondamental des assemblages et les procédés de construction.

Dans le cas d'un pont, le problème du choix des matériaux et de la structure est relativement simple, parce que l'expérience d'un grand nombre d'ouvrages permet à l'Ingénieur de savoir rapidement quelles sont les variantes, en nombre réduit, qu'il convient d'étudier.

Par contre, dans le cas des structures industrielles qui font appel à la collaboration de plusieurs techniques, le problème est beaucoup plus délicat. Prenons par exemple le cas d'une enveloppe de réacteur nucléaire; si on réalise cette enveloppe en béton précontraint, il est nécessaire de calorifuger et de refroidir le béton pour diminuer les contraintes provoquées par le gradient de température. L'optimisation résulte alors d'un bilan comprenant les prix de la structure, du calorifuge et du circuit de refroidissement, prix variables suivant le gradient qu'on laisse subsister.

Autre exemple de collaboration de techniques, toujours dans le domaine des réacteurs nucléaires: la réduction de l'encombrement des échangeurs de température a permis de les placer à l'intérieur de l'enveloppe, ce qui a conduit à des simplifications et à des économies importantes.

Dans le cas général c'est donc toujours d'une optimisation d'ensemble qu'il doit s'agir. Chaque technique doit poser son problème aux autres en leur disant «voilà ce que je préfèrerais; avez-vous une solution, ou bien combien cela coûte-t-il en plus pour vous; nous ferons le total».

Le problème de l'optimisation tel que nous l'avons posé est extrêmement général: sa résolution constitue le métier de l'Ingénieur dont la valeur se mesure par la qualité de la solution retenue.

Notons que le prix d'une structure est toujours une fonction discontinue des paramètres C. Ce n'est qu'une fois ces paramètres choisis que le problème se ramène à la recherche du minimum d'une fonction continue d'une ou de plusieurs variables. Tels sont les problèmes classiques de poutres ou de colonnes

d'égale résistance, de recherche des structures de poids minimum ou d'énergie de déformation minimum.

Nous jugeons toutefois que ces problèmes particuliers ne présentent qu'un intérêt mineur, car, d'une part, l'économie obtenue sera toujours faible, d'autre part, très souvent, la structure obtenu sera plus chère, voire même irréalisable, parce que trop complexe. Cependant, l'outillage et l'équipement permettent souvent, quand ils sont bien étudiés, de réaliser sans supplément de prix unitaire des structures théoriquement plus satisfaisantes. Il y a là un bilan à faire entre une simplification excessive des formes et les dépenses supplémentaires nécessitées, dans le cas du béton par exemple, par un coffrage plus élaboré et une mise en œuvre plus difficile. Cette remarque est parfaitement justifiée dans tous les cas où l'on doit réaliser un grand nombre de pièces identiques.

Il importe d'examiner plus en détail les paramètres dont l'influence sur le prix de la structure est la plus importante. Ce sont parmi les données les paramètres A 1 et A 2 et parmi les variables les paramètres C 2 et C 3. Reprenons ces points essentiels:

## 1. Amélioration de la qualité des matériaux et recherche de nouveaux matériaux

Deux facteurs jouent un rôle prépondérant pour l'amélioration des qualités des matériaux. Ce sont d'une part, l'augmentation des caractéristiques mécaniques (résistance et allongement), d'autre part, la diminution de la dispersion de ces caractéristiques. Il est alors possible, sans diminuer la sécurité, d'adopter des contraintes admissibles plus élevées. La résistance à la compression des bétons n'a cessé de croître, et il est vraisemblable que nous enregistrerons de grands progrès dans les années qui viennent. Depuis une dizaine d'années, grâce surtout à la précontrainte, la résistance à la rupture des fils d'aciers a augmenté d'environ vingt pour cent, sans que, pour cela, leur capacité d'allongement soit diminuée, bien au contraire.

L'importance de la recherche de nouveaux matériaux est illustrée par le développement prodigieux du béton précontraint au cours des trente dernières années. Le béton précontraint constitue en effet un matériau nouveau permettant de réaliser des structures dont le comportement mécanique est différent de celui des structures réalisées auparavant. Mais ce n'est pas le seul exemple: les bétons légers qui permettent de diminuer le poids propre sont de plus en plus employés, et nous verrons sans doute, dans un proche avenir, des bétons à base de résines synthétiques possédant des résistances considérables à la compression comme à la traction.

## 2. Connaissance des matériaux – Critères de sécurité et méthodes de calcul

Pendant longtemps, tout le calcul des structures a été fondé sur la loi de Hooke (modèle élastique). Le critère de sécurité était donné par la limitation des contraintes, sans souci particulier pour les déformations.

Les grands progrès récents sont dus à la prise en considération des déformations non élastiques grâce aux théories de la Plasticité. Seules ces théories permettent de tenir compte de l'adaptation des contraintes dans les sections d'une poutre, et, dans le cas des structures hyperstatiques, de montrer que l'adaptation entre sections donne à ces structures une résistance plus élevée que ne le laissait croire la théorie de l'Elasticité.

L'étude des déformations non élastiques a permis de créer de nouveaux modèles mathématiques de calcul tels que modèle rigide-plastique, modèle élastoplastique, modèle visco-élastique, etc., qui donnent une meilleure représentation des phénomènes réels que les modèles élastiques. Ces modèles sont, bien entendu, différents suivant le matériau considéré. Cependant nos connaissances concernant les déformations non élastiques de certains matériaux sont encore insuffisantes, surtout lorsque ces déformations dépendent du temps. Les recherches de laboratoire sur les relations entre les contraintes et les déformations doivent être poursuivies pour que l'Ingénieur puisse mieux prévoir le comportement réel des structures qu'il conçoit. Un problème important et mal résolu est celui de l'évolution dans le temps des contraintes dans une structure hyperstatique en béton armé ou en béton précontraint.

Le calcul des charges limites des structures est la plus simple des applications des théories plastiques. Ce calcul présente l'intérêt de donner une meilleure approximation du coefficient de sécurité que les calculs basés sur la loi de Hooke. C'est ainsi que les Ingénieurs et les Règlements ont reconnu la nécessité de vérifier la sécurité à la rupture des poutres en béton précontraint. Pourquoi ne le fait-on pas pour les arcs en béton qui se trouvent pourtant dans une situation très semblable? Simplement par habitude, en souvenir des temps où seules les théories élastiques étaient considérées comme sérieuses.

Toutefois, l'Ingénieur ne doit jamais oublier les conditions nécessaires pour que le calcul des charges limites donne des résultats corrects. En premier lieu, les déformations doivent rester petites; pour certaines structures, il est indispensable d'imposer une limitation des déformations. En second lieu, dans le cas des sollicitations variables, le calcul des charges limites conduit souvent à surestimer la capacité de résistance des structures. Le théorème général d'adaptation permet un calcul correct des structures hyperstatiques soumises à des charges variables. Rappelons l'énoncé de ce théorème, établi moyennant l'hypothèse des petites déformations:

«Si pour une structure donnée, l'état de contraintes obtenu en ajoutant:

a) l'état élastique de contraintes dû aux forces extérieures variables

b) un état de contraintes fixe formant un état de coaction appelé état d'adaptation

appartient au domaine élastique, cette structure demeurera stable et les contraintes résiduelles tendront vers les contraintes d'adaptation.»

L'adaptation peut du reste être facilitée par une compensation préalable obtenue par prédéformation.

Un problème important pour l'optimisation des structures est le suivant: Comment tenir compte, dans les critères de sécurité, des contraintes d'un état de coaction provoqué, par exemple par la température, le retrait ou le fluage? Faut-il les ajouter simplement aux contraintes dues à l'application d'un système de forces extérieures? Nous ne le pensons pas, mais le critère de sécurité reste à trouver. Signalons comme exemple les arcs en béton où le retrait et la température peuvent donner des contraintes élevées, et surtout les enveloppes en béton précontraint pour réacteurs nucléaires pour lesquelles les contraintes thermiques obligent à majorer fortement la précontrainte. Il faut toutefois faire très attention aux variations cycliques, car il y a une différence énorme entre un état de coaction stationnaire et les états de coaction résultant de phénomènes alternatifs.

### 3. Recherche de nouvelles structures

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, il y a encore beaucoup de structures nouvelles à trouver. L'Ingénieur qui étudie un projet doit faire preuve d'imagination, se méfier avant tout de la routine consistant à copier ce qui a déjà été fait sans y apporter d'amélioration. Ainsi, pourquoi construit-on encore des poutres à triangulation Pratt, alors que la poutre à triangulation Warren est plus économique? Comment se fait-il que ce n'est que récemment que l'on a construit des ponts à haubans, plus économiques et plus sûrs que les ponts suspendus classiques à câbles paraboliques?

Très souvent la recherche de nouvelles structures découle de l'amélioration des techniques de construction. Ce sont les progrès de la soudure qui ont permis la construction de structures métalliques tridimensionnelles. La technique de construction en encorbellement a permis la réalisation de ponts en béton précontraint de types nouveaux.

Les voiles minces nous paraissent un champ de recherche immense. Dans ce domaine, le rôle de l'expérience dans l'enhardissement progressif à l'égard de phénomènes encore mal connus, comme le flambement des coques, est prépondérant. Cette expérience est de deux natures: celle du constructeur qui sait, parce qu'il a fait un ouvrage et qu'il l'a éprouvé, qu'il peut aller plus loin, et celle du laboratoire, par des essais sur modèle réduit, malgré les difficiles questions de similitude.

### 4. Amélioration des techniques de construction

Nous distinguerons les assemblages et les procédés de construction proprement dits.

De nombreux exemples montrent que les assemblages constituent un des facteurs essentiels de l'économie d'une structure. Aujourd'hui les charpentes en bois, le cintre d'un grand arc par exemple, exigent trois fois moins de bois qu'il y a cinquante ans; cette économie est due uniquement à la conception des nouveaux assemblages: assemblages cloués pour transmettre les efforts de traction, nœuds de béton moulant les extrémités des fibres du bois pour transmettre les efforts de traction. Les charpentes en bois lamellé collé ont permis la réalisation économique de couvertures de grande portée. La précontrainte est le seul procédé satisfaisant pour assembler des pièces préfabriquées en béton: de très grands ponts construits récemment au moyen de voussoirs préfabriqués souligne l'intérêt de ce mode d'assemblage tant du point de vue de la rapidité et de la qualité de l'exécution que de l'économie. En construction métallique, l'apparition des boulons à haute résistance permet d'assembler rapidement et économiquement sur le chantier de grands éléments soudés en usine. C'est grâce aux progrès de la soudure que les charpentes composées de tubes, légères et économiques, ont pu se développer.

Mais il ne suffit pas de faire des projets, il faut aussi construire. L'importance des procédés de construction dans l'économie des structures est considérable. Citons, comme exemples, le développement de la préfabrication, l'emploi des coffrages glissants, la construction en encorbellement des ponts précontraints, et les grands progrès réalisés dans la technique de fondation des ouvrages. L'Ingénieur doit donc toujours avoir présent à l'esprit la façon dont sera réalisé l'ouvrage qu'il dessine; il doit chercher la facilité d'exécution qui se traduit par des gains de temps et d'argent et, en particulier, éviter le plus souvent la mesquinerie sous prétexte d'économie de matière.

Les développements précédents montrent l'importance et la diversité des connaissances que doit posséder l'Ingénieur chargé d'établir le meilleur projet d'une structure. Pour juger à coup sûr de la valeur de la solution retenue, il faudrait étudier totalement, construire et utiliser les diverses solutions mises en comparaison, autrement dit recourir à l'expérimentation. C'est possible, et c'est la meilleure solution du problème de l'optimisation dans le cas de pièces construites à un grand nombre d'exemplaires, par exemple des poteaux en béton précontraint pour lignes électriques.

Par contre, dans le cas des grandes structures, l'Ingénieur devra juger a priori de la solution choisie. Mais, à l'exception de structures très simples ou de structures dont une longue expérience a donné une parfaite connaissance, l'Ingénieur se heurtera à des difficultés que le calcul ne permettra pas de surmonter, parce que le calcul ne fait que transformer les hypothèses et ne crée

pas. Nous ne mésestimons pas pour autant l'intérêt des ordinateurs pour le calcul des structures: ce n'est que grâce à eux que la solution de certains problèmes a pu être étudiée complètement. Ils présentent en outre l'avantage de débarrasser l'Ingénieur d'une besogne fastidieuse, et de lui laisser tout le temps nécessaire pour concevoir, faire un examen critique des hypothèses, apprécier le degré de sécurité et réaliser.

Faute de pouvoir résoudre ses problèmes par le calcul, l'Ingénieur sera placé devant la nécessité de construire et d'expérimenter un ou plusieurs modèles réduits des structures ou des parties de structures qu'il étudie. Ce n'est pas sans difficultés, car le matériau du modèle réduit doit posséder des propriétés mécaniques et physiques semblables à celles du matériau de la structure réelle, sinon l'expérimentation sur modèle ne serait, comme la photoélasticité, qu'un instrument de calcul analogique. Les modèles réduits ont déjà rendu de grands services dans l'étude des barrages-voûtes, des voiles minces et des enveloppes de réacteurs nucléaires.

En résumé, l'optimisation des structures doit être fondée sur l'expérience et la connaissance précise des propriétés mécaniques et physiques des matériaux. Si l'on veut obtenir, dans un avenir proche, des progrès substantiels dans l'économie des structures, il faut développer les laboratoires d'essais des structures, trop peu nombreux à l'heure actuelle. Ces laboratoires auront une double tâche: d'une part, se consacrer à la recherche fondamentale des propriétés des matériaux, d'autre part, expérimenter des modèles réduits. Quant à l'Ingénieur, son principal souci doit être de faire preuve d'imagination créatrice, tant dans la conception que dans la réalisation des ouvrages.