

**Zeitschrift:** IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen

**Band:** 10 (1950)

**Artikel:** Utilisation maximum de la matière dans les constructions

**Autor:** Vallette, R.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-10590>

### 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:** 29.12.2025

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

# **Utilisation maximum de la matière dans les constructions**

*Höchste Materialausnützung bei Bauwerken*

*Maximum utilisation of material in building structures*

R. VALLETTE, Ingénieur Principal Honoraire du Service des Ouvrages d'Art de la S.N.C.F.

## **I. But**

Pour la conception d'un ouvrage, on peut adopter diverses bases: meilleur parti architectural ou constructif, recherche du minimum de matière ou de main-d'oeuvre, moindre délai d'exécution, etc.

Suivant la base choisie, on aboutit à des ouvrages différant considérablement. Il nous a paru intéressant de rechercher les solutions auxquelles conduit la conception basée sur l'*utilisation maximum des qualités des matériaux dans les constructions*.

Cette étude, que nous ne ferons qu'esquisser, comporte la recherche: des matériaux de plus haute qualité, de la meilleure façon de les utiliser, de la forme des ouvrages se prêtant le mieux à cette utilisation, avec la meilleure distribution de la matière et des contraintes.

## **II. Matériaux**

### **A. Qualités**

Nous allons examiner rapidement les capacités maximum de résistance qu'offrent les principaux matériaux de construction: bois, pierre, acier, béton, pour leur utilisation dans les ouvrages.

#### **1. Bois**

Le bois a une structure très anisotrope, définie par rapport au sens des fibres. Sa capacité de résistance est ainsi très variable suivant le sens des sollicitations; elle peut être accrue par traitement, le simple collage l'améliore.

Un effort considérable a été fait pour sa valorisation en construction. Les études techniques suisses, et notamment la mise au point des conditions de

résistance pour des *efforts obliques aux fibres* faite par M. STÜSSI, permettent de déterminer d'une façon très sûre, les contraintes à admettre dans les constructions.

*En France*, les recherches faites sous la direction de M. CAMPREDON ont abouti à des normes relevant notamment les contraintes admissibles passées, par exemple pour la compression dans le sens des fibres, de 70 kg à 120 kg/cm dans des cas définis de qualité et d'emploi. Cela montre le progrès accompli. D'autre part, les *normes d'utilisation du bois* publiées, et le *Manuel du bois*, en cours de publication, permettent de fixer au maximum ces contraintes suivant les conditions de la construction.

## 2. Pierre

La pierre a connu un renouveau dans la Reconstruction S.N.C.F., qui a conduit à pousser plus avant son étude technique.

Les pierres cataloguées depuis longtemps suivant les carrières et les bancs, ont des caractéristiques bien définies qui ont été codifiées par des Normes, qui donnent une relation scientifique entre la dureté, la résistance et la densité des pierres, définissent leurs propriétés physiques et établissent leur identité.

Ces données, complétées par les études et essais faits par le Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics sous la direction de M. L'HERMITE, nous ont permis d'utiliser la pierre dans les cas courants, avec des contraintes moyennes égales au  $1/10$  de la résistance sur cube (au lieu de  $1/20$  anciennement) et, dans les cas spéciaux et pour les contraintes localisées, avec des taux allant jusqu'au  $1/5$  de cette résistance. Nous sommes ici en accord avec les taux pratiqués en Suisse, qui constituent le maximum d'utilisation des propriétés de la pierre.

## 3. Acier

L'acier est le matériau qui possède les plus hautes qualités pour résister aux efforts: contraintes limites les plus élevées pour toutes sollicitations, avec une gamme étendue, caractérisée par des résistances à la traction pouvant aller de 35 à 250 kg/mm<sup>2</sup>, plasticité notable permettant l'adaptation aux efforts, façonnage, en principe en toutes formes.

*Que doit-on retenir pratiquement pour la construction, en fonction de la production offerte par les Aciéries?*

En tous pays, les Forges poussent à l'emploi de l'acier doux courant; il correspond à la marche normale de l'Aciérie Thomas: haut-fourneau, mélangeur, Bessemer. La production d'acier de nuances plus élevées dérange cette chaîne normale et donne lieu à des plus values prohibitives.

*Il y a là un désaccord entre l'Aciérie et les Constructeurs.*

Ces derniers désirent, pour les constructions courantes, un bon acier doux, soudable, à limite élastique garantie voisine de 24 kg/mm<sup>2</sup> et, pour les construc-

tions spéciales ou chargées, un acier soudable de *limite élastique voisine de 36 kg*, d'un prix peu supérieur à l'acier doux.

Les normes françaises comportent des nuances pouvant convenir, mais elles ne sont pas couramment produites.

*Un acier hors norme (A. 55)*, se substituant à l'acier A. 54 codifié en 1933 et qui convenait alors comme caractéristiques et comme prix, est actuellement offert, mais à un prix élevé. .

*L'acier A. 54* avait donné lieu à certaines difficultés de rivure avec l'acier A. 50, mais elles avaient pu être surmontées. Néanmoins, sous l'impulsion de l'Association française des Ponts et Charpentes, un *nouvel acier à rivets R. 42/28* a été mis au point et donne mieux satisfaction. *Cela résout la question technique.*

Le problème de la fourniture à de bonnes conditions subsiste. Il faut reconnaître qu'il n'est pas simple pour l'Aciérie, qui doit combiner coulée et programme de laminage pour de faibles tonnages demandés en divers échantillons, la demande en acier mi-dur restant proportionnellement faible.

Il nous souvient, qu'après avoir poussé à l'emploi maximum d'acier 54 pour nos ponts rails, les difficultés de livraison nous avait fait l'abandonner complètement.

Quoi qu'il en soit, nous pouvons noter que, normalement, l'utilisation maximum des qualités de l'acier pour la construction des ponts et charpentes correspond à l'emploi d'acières de limite élastique de 24 et 36 (soit A. 40 et A. 55).

Nous ajouterons qu'*on peut disposer d'un acier soudable de construction à 75 kg de limite élastique*, élaboré électriquement par ARMCO, pour le cas où le poids propre prend une influence déterminante.

*Enfin, pour l'acier en fil*, outre les tréfilés utilisés depuis longtemps, on peut obtenir aujourd'hui du fil machine (trempé au plomb) à hautes caractéristiques, fourni notamment en France par Longwy en *nuance 140/90* qui, normalisé par étirage, devient très avantageux par rapport à l'acier doux, par son prix et par le gain de poids direct et indirect qu'il procure, et *dont on peut envisager l'emploi pour toutes natures de constructions en tous matériaux*. En contre partie, son emploi à haute contrainte exige *sa mise en extension préalable*. Complémentairement, on profite de cette extension pour régler les contraintes de la construction (béton précontraint).

#### 4. Béton

Les bétons, forme d'utilisation des liants hydrauliques dans les constructions résistantes, dépendent évidemment de la qualité de ces liants.

Les cimentiers fournissent depuis longtemps des produits de haute qualité et on peut se fier aux livraisons qu'il garantissent.

En France, sous l'impulsion du *Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques*, les normes nouvelles ont classé les liants d'une façon plus précise, tant pour les Portlands que pour les laitiers divers. Pour ces derniers, les broyages fins à l'eau et à sec les ont encore valorisées (ciment Trief).

Pour le béton, ses qualités dépendent du dosage, de la granulométrie des agrégats et de la composition (rapport gravier/sables).

Pour la composition, avec les deux composants habituels gravier et sable, et quelle que soit leur granulométrie, *il est évident* que, parmi tous les bétons ouvrables que l'on peut faire, le meilleur sera fourni *par la composition pleine à minimum de sable*: mortier le plus riche, minimum d'eau (résistance), meilleur enrobage des grains en pâte pure, absence de vides (imperméabilité, résistance au gel).

Nous avons indiqué au *Congrès de Liège* comment on détermine automatiquement et expérimentalement de telles compositions pour tous composants: mortier plein à minimum de ciment (il est préférable d'avoir un excès de 20%), puis béton plein à minimum de mortier, ouvrable suivant les conditions du chantier.

L'application à ce jour à plusieurs milliers de chantier, nous permet de considérer cette solution *comme définitivement acquise* (*Annales de l'Institut du Bâtiment et des Travaux Publics*, fascicule 66).

Ces compositions ont été adoptées pour les bétons routiers (*Annales des Ponts et Chaussées*, avril 1949).

D'autre part, nous pouvons indiquer l'approbation donnée pour les bétons de barrage, par M. COYNE, aux granulométries discontinues (entre catégories) que nous avons données.

Ce sont elles qu'il faut utiliser quand on est maître de les fixer. Elles s'imposent, par ailleurs, quand on recherche les plus hautes résistances.

Nous donnerons de nouveaux résultats obtenus pour le rapport  $\frac{C}{E}$

<i>Caillou</i>	2,44	pour	$c = 250$
<i>Gravillon</i>	2,66	„	$c = 350$
	2,98	„	$c = 400$
plus de	3,1	„	$c = 450$

Les résistances peuvent s'exprimer par la formule:

$$R = 0,55 Rm \left( \frac{C}{E} - 0,50 \right)$$

$Rm$  étant la résistance du mortier normal correspondant.

D'autre part, la Société A.T.R.U. a obtenu, aux Mines de Sarre et Moselle, pour des voussoirs de galeries, des résistances de *l'ordre de 1000 kg avec de ciment de laitier*, grâce à une technique d'exécution et à une *discipline de chantier modèles*.

La confiance que l'on peut avoir dans ces compositions, a permis d'accepter, pour les pylônes d'électrification sur Paris-Lyon, des contraintes de 220 kg pour les charges normales du service.

Cet ensemble de faits fixe l'utilisation maximum que l'on peut tirer des liants hydrauliques pour la construction.

### B. Détermination de la qualité des matériaux

La détermination de la capacité de résistance des matériaux, notamment sous contraintes multiples, a fait l'objet de mises au point, traduites en particulier par les *Normes suisses*, et représentées en France par la *synthèse générale* qui vient d'être faite par M. PROT à l'Institut du Bâtiment et des Travaux Publics (séance de mai 1950).

Les méthodes de déduction de la capacité de résistance des matériaux en *partant d'essais sur éprouvettes*, étudiées au Congrès de Liège et précisées par MM. R. LEVI et PROT (Annales des Ponts et Chaussées, oct. 49, Conférence à la Société des Ingénieurs Civils), constituent une base certaine pour fixer les contraintes admissibles sur éprouvettes, et qui demeure, même en tenant compte des réserves exprimées dans la mise au point d'une si grande ampleur, sur les conditions de sécurité, que constitue le rapport de M. CAMPUS au Congrès de Liège.

La transposition sur ouvrage demande quelque discernement pour les pièces de plus faibles dimensions que les éprouvettes.

Elle est directe quand les dimensions sont comparables, ou encore quand des essais sur pièces permettent d'obtenir une relation, comme celle que M. CHAMBAUD a indiqué dans son rapport au Congrès (adoption pour le béton d'un coefficient de sécurité de 2 par rapport aux moyennes obtenues sur cubes). Ce coefficient 2 peut être adopté chaque fois que les *essais sur pièce* donnent une certitude sur la résistance de la construction. Les résultats obtenus par M. CASSE sur des éprouvettes en acier, ont été déjà exploités par les constructeurs de charpentes métalliques.

## III. Utilisation maximum des qualités des matériaux

### A. Distribution de la matière dans la section

#### 1. Traction et compression peu excentrée

En traction et compression simples, la matière peut être distribuée librement, à condition qu'elle soit centrée sur l'effort.

Cette distribution est automatique pour les fils en traction.

*La compression peu excentrée* existe dans les ouvrages en pierre ou béton, qui ne résistent pas aux tractions: murs et piles avec efforts transversaux, voûtes, par suite de leur équilibre spécial.

On peut équilibrer cette compression par une section massive mais une *distribution de la matière* permet de mieux l'utiliser: murs à contreforts, piles à section creuse (ponts de la ligne de Rouen).

La stabilité étant assurée par le poids de la construction, cela conditionne la *forme de l'ouvrage*, qui doit épouser la courbe des pressions le plus étroitement que le permet la résistance du matériau.

Dans les voûtes, cette courbe est indéterminée a priori; les déformations, dues à l'effort normal et à la température, introduisent en outre des fissures qui modifient les parties portantes des sections. Il faut donc *considérer la voûte comme un système à sections variables*, à parties fissurées, pour tracer la courbe des pressions, *qu'il suffit d'établir dans les parties actives, en égalisant les excentricités*, et en réduisant les sections dans cette situation autant que le permet la résistance du matériau (VALLETTE — Construction des Ponts — Dunod).

Cette règle a été utilisée à la S.N.C.F. notamment pour le tracé de la voûte du pont de Lessart (voûte en béton de 88 m, la plus grande sous rail) et pour les voûtes du viaduc de Poix, un des plus hardis qui existe, avec une épaisseur de pile égale au  $\frac{1}{8}$  de l'ouverture).

## 2. Flexion, poutres et arc

La flexion conduit à une distribution excentrée de la matière, réalisée différemment suivant les matériaux et les moyens d'assemblage.

### a) Bois

Pour les fermes de comble, les débits des bois en barres de section réduite, conduisent à une distribution parfaite avec les formes à treillis, les conditions d'assemblage, fixées par les Normes françaises, permettent une bonne utilisation des sections, mais les *systèmes mixtes*: barres comprimées en bois, barres tendues en acier, donnent une solution plus complète.

Le collage a permis des formes nouvelles.

En Suisse et en France, des *poutres à âme pleine* ont été exécutées par collage, ainsi que des *parois de silos* autoportants (Conférence de M. GAUTHIER le 6 juin 1950 à l'Institut B.I.P. de Paris). Des *toitures autoportantes* en bois lamellés ont été faites en Suisse. Rien ne s'oppose à ce que l'on exécute de *grandes voûtes* de ce type avec triangulation.

### b) Acier

L'acier, matériau entièrement préfabriqué et qui conserve ses qualités sous les plus petites dimensions, permet une *distribution parfaite de la matière* en fonction des efforts, et cela a été réalisé dès le début de la construction métallique.

Les profiles eux-mêmes, fournis par les Aciéries, comportent cette répartition pour résister aux flexions. Ce n'est que récemment, qu'en *faisant état de la plasticité*, on a pu utiliser plus complètement la matière des poutrelles (*Règles francaises C.M. 46 et 50*).

*La soudure*, comme moyen d'assemblage, peut contribuer à modifier les formes des sections, quand on aura mieux pénétré le mécanisme des retraits.

*Les retraits* ont été très étudiés expérimentalement et *peu théoriquement*; il nous semble qu'une telle étude pourrait être profitable.

*On peut examiner comme suit leur mécanisme.*

La chaleur dégagée par la fusion produit des isothermes (fig. 1) avec libre dilatation des parties chauffées vers la partie fondue ou plastifiée; la solidification se faisant dans cet état, le refroidissement produit les contractions extérieures bien connues, (et des contractions internes) qui s'équilibrent sur des zones comprimées (en produisant une flexion).

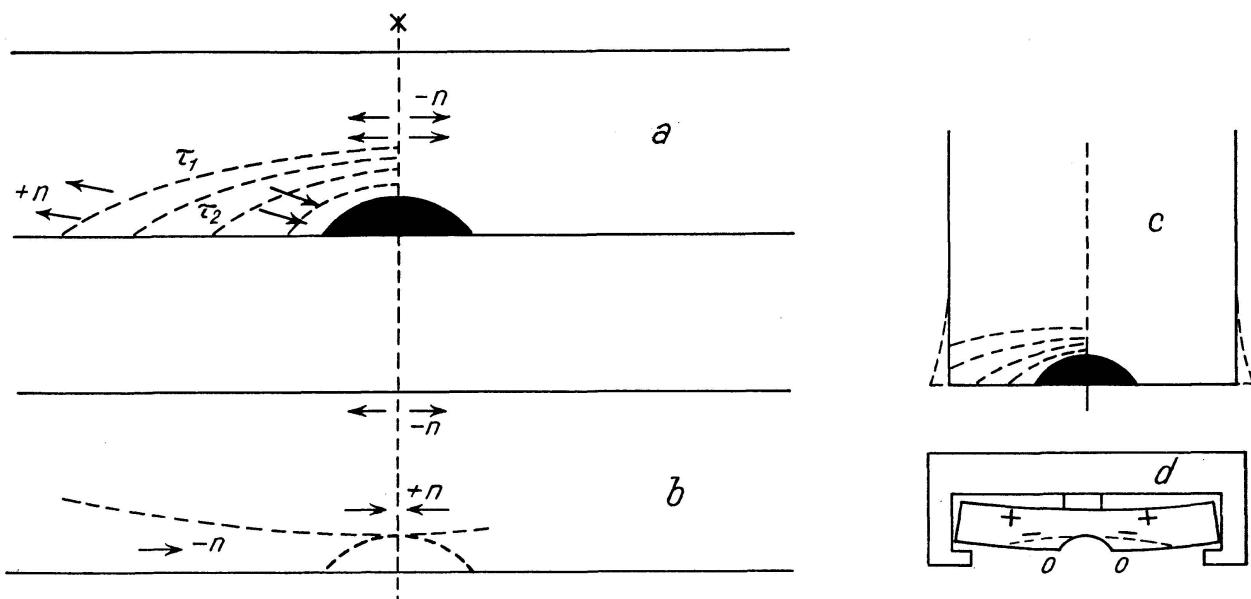


Fig. 1

Interprétation de la production de contraintes de retrait transversales après soudure

- a) Pièce large et épaisse, isotherme, dilatation vers la soudure
- b) Contractions longitudinales après soudure
- c) Pièce étroite, dilatation libre
- d) Principe d'un dispositif correctif

On peut déjà en déduire quelques remarques:

1. *Les pièces minces* que la chaleur traverse, et moins bridées pour la dilatation des parties chauffées, comporteront moins d'efforts de contraction.
2. *Un refroidissement local* empêchant la dilatation réduirait ce mécanisme.
3. *Un préchauffage général*, atténuant les différences de température, aura un même effet sur ce mécanisme.
4. *Une flexion transversale*, produite par chauffage, ou mécaniquement (fig. 1d) maintenue sur la pièce plastifiée par la fusion, puis relâchée après solidification, produira vers la soudure des compressions corrigéant les tractions de retrait.
5. *Sur les pieces étroites* à libre dilatation latérale, l'expansion vers la soudure serait très réduite, donc les contractions corrélatives.

Cela permet d'envisager, comme peu susceptibles à cet égard, un certain nombre de *profils de membrure*, comme ceux de la figure 2, permettant une distribution massive de la matière *dans la section*.

Pour la *distribution le long de la poutre*, le laminage actuel oblige à une distribution discontinue, mais on peut penser qu'il n'est pas hors des possibilités des lamineurs de fournir *des barres d'épaisseurs variables* qui donneraient la solution.

Par contre, pour l'Aciérie, cela substitue à une barre facile à obtenir, une barre moins lourde avec une façon supplémentaire. Comme pour les nuances, les points de vue s'opposent.

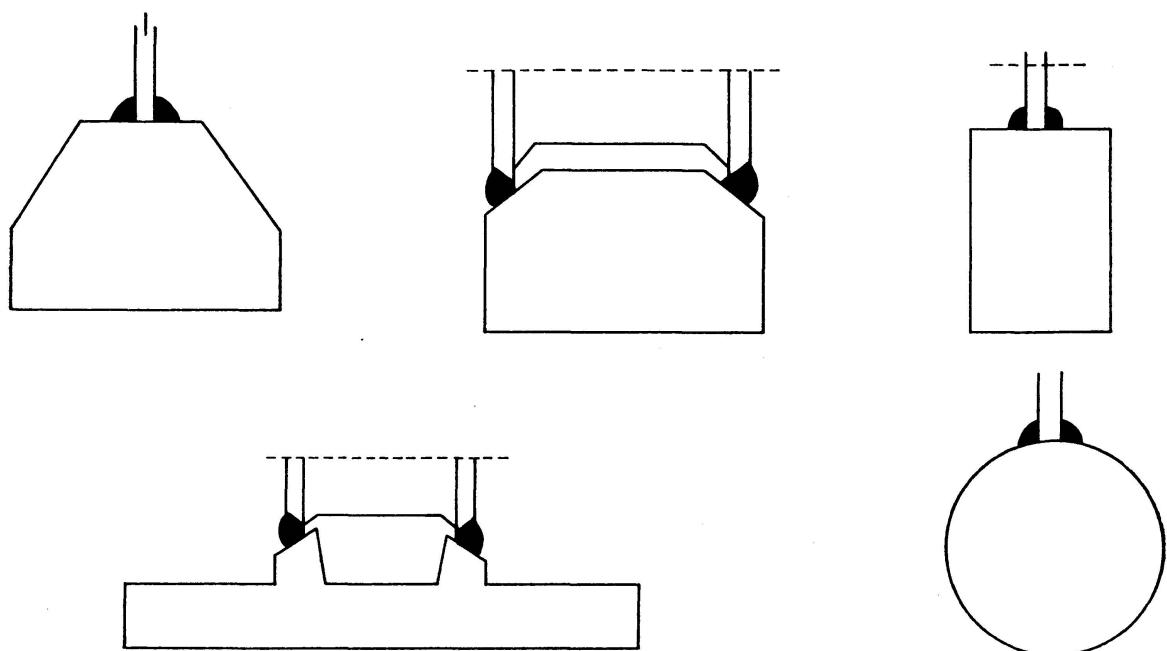


Fig. 2. Profils massifs de membrures évitant les contractions transversales

### c) Béton armé

Pour le béton armé, la distribution de la matière: béton en compression, armature en traction, avec l'épaisseur obligée du béton et le diagramme linéaire spécial du béton armé (qui annule le béton tendu), est moins favorable que pour l'acier et la *membrure comprimée est mal utilisée*.

Elle le serait plus mal encore si le rapport  $m$  des modules d'élasticité était pris égal à 6, sa vraie valeur, ce qui remontrait la fibre neutre.

Les valeurs courantes 10 et 15 agissent dans le sens de la loi non linéaire envisagée dès le début du béton armé et reprise en dernier lieu par M. CHAMBAUD au Congrès de Liège, et qui tend vers une utilisation *bien plus avantageuse de la matière*.

On a, par ailleurs, usé de tous les moyens permettant d'excentrer le plus possible le béton et l'armature avec les profils creux des poutres caissons et des voûtes et avec les hourdis nervurés minces (sollicités dans les 2 sens) ou les voiles autoportants soumis aux flexions longitudinales et aux flexions transversales.

Enfin, on peut modifier le diagramme des contraintes par les divers moyens de précontrainte indiqués ci-après, avec ou sans mise en traction de l'armature.

### B. Formes des ouvrages

L'utilisation de la matière est bien différente suivant les formes adoptées pour les ouvrages: barrages poids, ou en voûte, ou à contreforts, murs pleins ou évidés, poutres ou arcs divers.

Nous allons examiner ces deux dernières formes:

#### 1. Poutres

Les poutres peuvent être à membrures droites ou courbes, avec âme pleine ou à treillis, à membrures et âme minces (acier) ou épaisse (béton armé).

##### a) Poutres en acier à âme pleine ou à treillis

1. *Treillis en V et en N, angle optimum.* La quantité de matière par mètre de poutre pour transporter un effort tranchant  $T$  avec les treillis en  $V$  d'angle  $\alpha$ , de longueur  $l$  et de section  $w$ , travaillant à la limite  $R$  admissible, est (fig. 3):

$$\frac{\omega l_1}{a} = \frac{T}{R \sin \alpha} \times \frac{h}{\sin \alpha} \times \frac{\operatorname{tg} \alpha}{h} = \frac{2 T}{R \sin 2 \alpha}$$

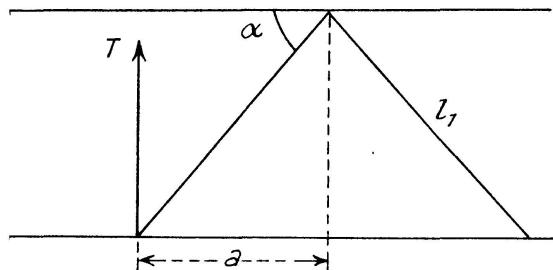


Fig. 3. Treillis en V

Expression qui est minimum pour  $\alpha = 45^\circ$  qui est donc l'angle le plus favorable pour ces treillis. Une quantité double est nécessaire pour  $\alpha = 15^\circ$  ou  $75^\circ$ .

Pour les treillis en  $N$ , l'angle le plus favorable est  $37^\circ$ , avec une quantité égale au  $3/2$  de celle du treillis en  $V$ .

2. *Ame pleine.* Dans les mêmes conditions, on a, pour l'âme pleine:

$$w = \frac{T}{R'}$$

soit, en posant  $R' = 0,75 R$ , les  $2/3$  du meilleur treillis, grâce à l'utilisation d'un état double de contrainte.

Mais, cela suppose que l'âme est d'épaisseur variable, distribuée comme l'effort tranchant.

Cette quantité de matière est indépendante de la hauteur des poutres, les membrures seules variant comme elle (cela a permis en Amérique, de prévoir des poutres de 30 m avec 2 mailles de 15 m, et 12 m de hauteur).

3. *Quantité brute totale de matière. Comparaison:* On envisagera la charge uniforme habituelle.

Pour les *membrures minces*, on a (2 membrures, avec distribution des sections):

$$2 \times \frac{p l^2}{12 R} \times \frac{1}{h}$$

et, pour *l'âme pleine distribuée*

$$\frac{p l^2}{4 R'} = \frac{p l^2}{3 R}$$

Si l'on tient compte de la distribution pratique des membrures au  $\frac{3}{4}$  au lieu des  $\frac{2}{3}$  et de l'âme d'épaisseur constante, on a, comme quantité totale avec  $\frac{p l^2}{8 R} = A$ :

$$\text{âme pleine} \quad Q = \frac{3}{2} A \left( 3,5 + \frac{1}{h} \right)$$

$$\text{treillis en } V (45^\circ) \quad Q = \frac{3}{2} A \left( 4 + \frac{1}{h} \right)$$

$$\text{treillis en } N (37^\circ) \quad Q = \frac{3}{2} A \left( 6 + \frac{1}{h} \right)$$

La *poutre à membrure parabolique* dont l'âme est négligeable relativement, donne:

$$Q = 2 A \frac{1}{h}$$

Des treillis *tous rayonnants* à l'appui donneraient (charge uniforme non mobile)

$$Q = \frac{3}{2} A \left( 9 + \frac{1}{h} \right)$$

Si grossière que soit cette comparaison, elle montre que:

a) Pour les faibles élancements ( $< 10$ ), une *distribution de l'âme pleine* procurerait un gain de plus de 10% (cela est possible en changeant d'épaisseur de tôle, sans lier les panneaux, un joint ouvert étant sans conséquence).

b) Compte tenu des raidisseurs d'âme, il y a très peu de différence entre l'âme pleine constante et le treillis en  $V$  à  $45^\circ$ .

c) *La poutre parabolique* à membrure constante équivaut à la poutre à âme pleine de hauteur constante vers  $\frac{1}{h} = 10$ , elle s'en écarte ensuite avec un supplément de 10% vers  $\frac{1}{h} = 20$ .

Ces données peuvent orienter pour le choix judicieux des formes.

La figure 4 illustre certains résultats.

b) Poutres en béton armé

On a la même comparaison pour les treillis.

Pour l'âme pleine, la variation d'épaisseur est facile à réaliser et se pratique couramment (ponts S.N.C.F.), l'épaisseur étant d'ailleurs déterminée par des conditions arbitraires pour le cisaillement, tandis que ce sont des efforts de traction (pris par l'armature) et de compression (pris par le béton) qui sont en cause. Le béton est ainsi *plus mal utilisé que dans les poutres à treillis*, dont les barres tendues, mises en charge sur barres nues, pourraient être ensuite enrobées au minimum. Mais la solution de la *poutre parabolique*, qui réduit au maximum les treillis, devient alors celle qui utilise le mieux la matière.

De telles poutres ont été utilisées pour de grands ponts (Castel Moron. La Coudette); on peut les généraliser.

Pour l'utilisation de l'acier, nous signalerons qu'il y a avantage à étirer les barres, on évite ainsi les déformations plastiques, indispensables pour l'adaptation locale en charpente métallique, nuisibles pour le béton.

L'emploi d'acier mi-dur est judicieux. Au-delà, les déformations interviennent avec l'acier dur et l'emploi de fils à haute limite élastique oblige à leur mise en allongement préalable pour neutraliser l'effet de ces déformations. Complémentairement, on est conduit à régler la prétraction pour obtenir le meilleur état de contrainte du béton. Ces questions sont traitées ci-après.

## 2. Arcs

Comparé à la poutre parabolique à tirant et treillis, l'arc sans treillis (bow-string) supporte des flexions plus importantes dans la membrure supérieure en arc. Cela conduit à une autre distribution de la matière (haute section creuse au lieu de section pleine); néanmoins, la section nécessaire reste plus forte.

Dans les deux cas, l'effet de la température n'est pas en cause.

L'arc simple sur culée subit cet effet qui peut devenir prépondérant. L'étude des formes prend alors une importance singulière: forme de la section, tracé de l'arc, surbaissement, loi de variation du moment d'inertie des sections le long de l'arc, pour obtenir les moments minimum. Il faut y ajouter la détermination judicieuse de la contrainte admissible.

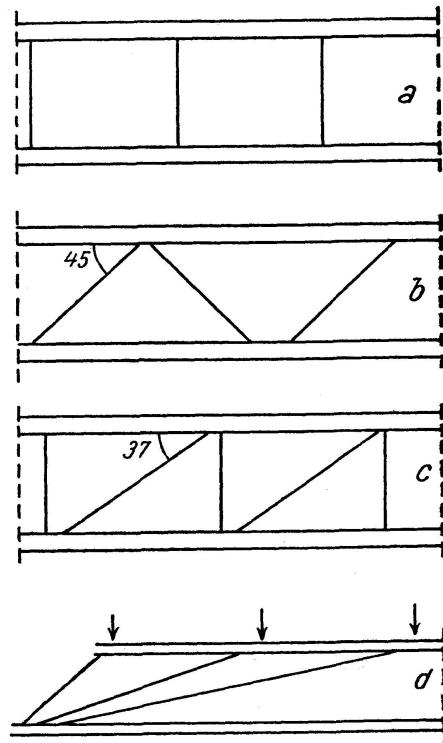


Fig. 4. Ames de différents types

- Pleine, variable  $w = 1$
- Treillis en  $V$  à  $45^\circ$   $w = 1,5$
- Treillis en  $N$  à  $37^\circ$   $w = 2,25$
- Treillis rayonnant  $w = 3,3$

Cette étude scientifique est indispensable si on veut utiliser au mieux la matière, les quantités pouvant varier du simple au double pour de faibles différences dans la fixation de ces éléments (voir publication du Congrès de 1936, pont de La Roche Guyon). Le nouveau pont de Fin d'Oise près de Paris, avec ses assouplissements de clé et de naissances, montre encore ce que l'on peut obtenir par une telle étude (portée 101 m, surbaissement 1/10,6, section tubulaire avec 2 membrures de 0,21, loi du moment d'inertie, fig. 5).

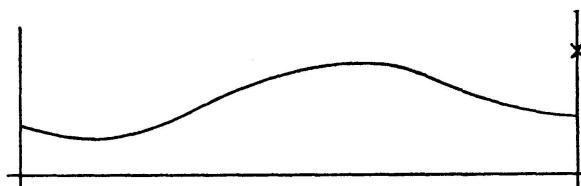


Fig. 5. Loi d'inertie du nouveau pont de Fin d'Oise

### C. Emploi du fil à haute limite élastique dans les constructions

L'intérêt de l'emploi de ce fil au point de vue de l'utilisation maximum de la matière est ici manifeste, la section d'acier nécessaire étant réduite à 15% de celle de l'acier doux.

D'autre part, l'allègement qui en résulte pour l'ouvrage, permet de nouvelles possibilités dans l'art de construire et le fait que ce fil est produit en fil machine 140/90 (pouvant être étiré à 125 kg/mm<sup>2</sup>) procure une notable réduction de prix.

Mais immédiatement, une condition s'impose: ce fil employé à des contraintes de l'ordre de 100 kg, subit des déformations de quelque 5/1000, insupportables pour la construction, *sa mise en allongement préalable s'impose donc*.

Sous cette réserve, il peut être employé pour toutes les parties tendues de toutes constructions. Il faut le maintenir allongé pour les surcharges en le bloquant sur un support approprié et régler sa prétraction pour fixer l'état de contrainte de l'ouvrage, suivant un diagramme défini.

On a pu croire, de ce fait, que cet allongement était destiné à comprimer le support (béton ou acier) et qu'une grande déformation était nécessaire pour réduire les relaxations du béton.

Il n'en est rien, le support n'est qu'un entretoisement neutralisant la déformation, mais qui n'intervient pas dans la résistance (sa contrainte est nulle sous surcharge). D'autre part, la réduction des relaxations (et le réglage des contraintes), peut se faire avec l'acier doux.

Le réglage des contraintes est d'ailleurs un problème indépendant que nous traitons ci-après, qui peut utiliser d'autres moyens et comporter d'autres diagrammes.

Cette conception de l'emploi du fil à haute limite élastique, soit en charpente métallique, soit en béton armé, étend notablement le champ de cet emploi et le rend très simple.

Cet emploi peut s'étendre, par exemple, au pont suspendu à treillis, qui rejoint alors la poutre continue de hauteur très variable (fig. 6). Une étude attentive montre que la solution est valable pour toute portée, l'effort tranchant réduit étant très faible dans ce type d'ouvrage et il est facile d'y satisfaire même pour les longues barres.

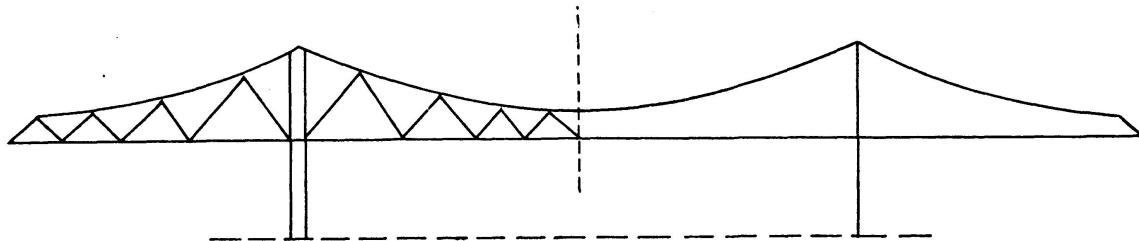


Fig. 6. Type de poutre continue suspendue à treillis, avec câble et barres en fil à haute contrainte maintenus en extension

Contrairement à une opinion émise, l'association: fil à haute limite élastique et acier doux, peut être avantageuse en réduisant la butée et la prétraction, la déformation étant seule en cause pour fixer cette association.

#### D. Réglage des efforts et des contraintes dans les constructions

##### 1. Réglage des efforts dans l'ouvrage

Il est pratiqué depuis longtemps, notamment:

a) Dans les poutres continues courantes ou spéciales, par réglage des appuis ou des culasses (ponts de la Reconstruction S.N.C.F.).

b) Dans les voûtes et arcs (joints matés, articulations provisoires, appuis à clavettes, vérins à la clé).

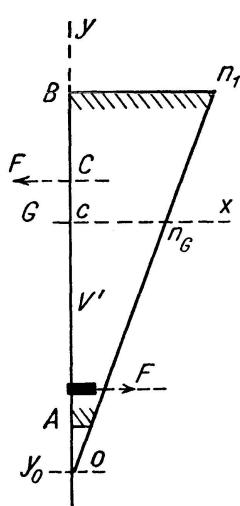
Dans les deux cas, il y a modification des réactions d'appui, ce qui influence seulement les efforts dans le premier (modification des moments), les efforts et la distribution des contraintes dans la section, dans le deuxième.

##### 2. Réglage interne des contraintes

a) *Dans les poutres en béton précontraint, ce réglage s'effectue sur la poutre entièrement constituée, sur béton durci par réglage de la prétraction F du fil d'armature, qui fixe pour un état de charge donné la position du centre de compression et le diagramme des contraintes par les formules (origine centre de gravité) fig. 7:*

$$c = \frac{r^2}{y_0}, \quad F = \frac{M}{z} = n_G \omega$$

$y_0$  ordonnée de la fibre neutre pour le diagramme triangulaire de contrainte choisie



- c ordonnée du centre de pression
- r rayon de giration.
- $z = c + v'$ ,  $v'$  ordonnée du centre des aciers
- $M$  moment dû à l'état de charge choisi
- $n_G$  contrainte au centre de gravité
- $\omega$  section totale du béton.

*L'armature peut être en acier de toute nuance pour établir cet état de contrainte.*

Fig. 7. Réglage des contraintes d'une poutre par prétraction d'armatures, diagramme pour la charge totale

### b) Autre mode de réglage par une exécution par phases

L'exécution par phases est utilisée pour les voûtes et arcs (exécution par rouleaux) et crée un état de contrainte particulier dont il est tenu compte au réglage final, mais cette exécution a surtout pour but alors le soulagement du cintre.

Un réglage des contraintes par les phases d'exécution des voussoirs a été appliqué au Pont de La Caille.

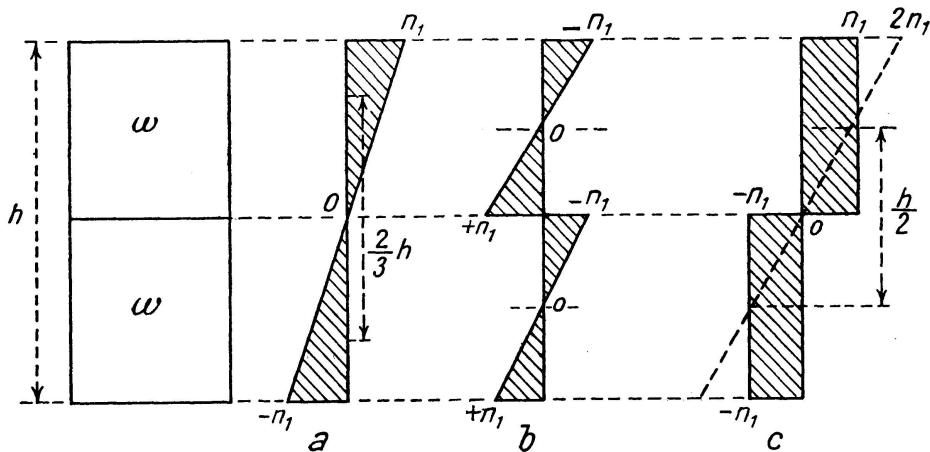


Fig. 8. Poutre rectangulaire avec réglage des contraintes

- Diagramme normal
- Diagramme appliqué aux membrures séparées
- Diagramme total après assemblage

*Voici comment ce moyen très général peut être appliqué aux poutres.*

Considérons par exemple le cas d'une poutre à section rectangulaire,  $2w$ , homogène.

Le diagramme normal (*a*) des contraintes (fig. 8) donne une capacité de résistance:

$$M = \frac{n_1}{2} w \frac{2}{3} h = n_1 \frac{wh}{3},$$

pour la contrainte maximum  $n_1$ .

Une exécution en deux demi-poutres mises en charge avant assemblage suivant le diagramme *b*, donne, après assemblage (collage, pour le bois, soudure, etc....) le diagramme *c*, avec contraintes finales uniformes, la capacité de résistance devenant:

$$M = n_1 w \frac{h}{2}$$

supérieure de 50%.

Avec deux membrures de  $\frac{h}{4}$ , on aurait encore par le réglage séparé des contraintes de chaque membrure, avant fixation à l'âme, *un gain voisin de 25%* (fig. 9).

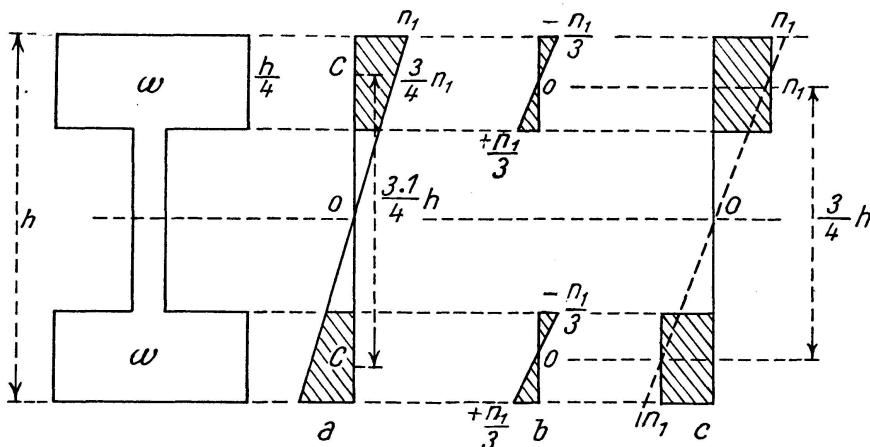


Fig. 9. Même réglage qu'à la figure 8 pour une poutre de membrure  $\frac{h}{4}$

**Béton armé.** Avec une poutre en béton armé le réglage dans la membrure basse n'est pas en cause, il suffit de lier la membrure supérieure aux étriers, après durcissement et réglage de ses contraintes.

On passe (fig. 10) du diagramme *a* au diagramme *c* et d'une capacité de résistance

$$M' = w \frac{n_1}{2} \times \frac{8}{9} h = \frac{4}{9} w h n_1,$$

à une capacité

$$M_2 = \frac{5}{6} w h n_1$$

soit les 15/8.

Le diagramme *b* de réglage de la membrure supérieure est facile à obtenir pour toute forme de poutre.

Pour les poutres à membrures séparées (poutres à treillis), ce réglage revient, si  $M$  est le moment total sous surcharge, à appliquer à la membrure supérieure le moment  $\frac{Mi}{I}$  ( $i$ , moment d'inertie de la membrure et  $I$ , moment d'inertie total,  $\frac{i}{I}$  n'est normalement que de quelques centièmes) et à la sceller aux treillis déjà enrobés dans la membrure inférieure. On peut d'ailleurs créer l'état de contrainte préalable dans la membrure supérieure par prétraction d'armatures.

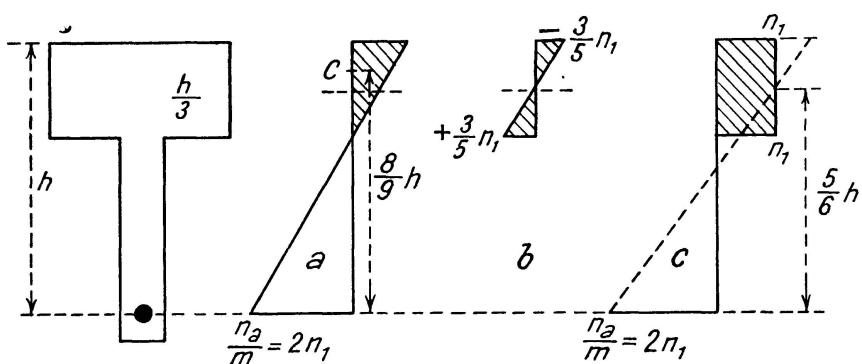


Fig. 10. Réglage des contraintes de la membrure supérieure d'une poutre en béton armé

- a) Diagramme normal
- b) Diagramme appliqué à à la membrure avant assemblage
- c) Diagramme final après assemblage à à l'âme

*Autres moyens.* On peut encore opérer en créant l' t t de contrainte uniforme dans la membrure *en l'articulant* et en appliquant la charge maximum; on bloque ensuite les articulations et on décharge. Cela convient surtout à la poutre *parabolique à treillis* très surbaissé (fig. 11) qu'il suffit d'articuler à la cl  e et de charger uniformément sur tirant nu, qu'on enrobe ensuite en scellant les treillis (qui sont très réduits, l'effort tranchant étant  $q \frac{1}{8}$  au milieu, et nul à l'appui,  $q$  surcharge p. m.).

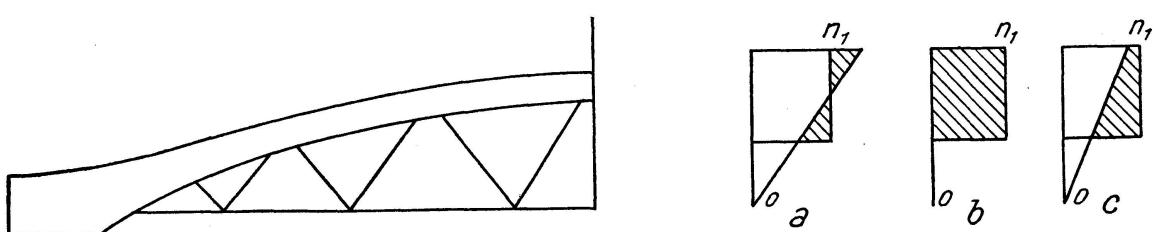


Fig. 11. Poutre parabolique surbaissé à treillis, réglage des contraintes dans la membrure supérieure

- a) Par application du moment  $\frac{Mi}{I}$  produit par des charges à l'appui, ou transversales
- b) Par articulation ou par traction du tirant sous la charge totale
- c) Par les mêmes moyens sous le poids propre de la membrure

On peut opérer sous le seul poids propre en désaxant l'articulation (ou en utilisant des vérins).

On peut évidemment opérer en laissant l'arc chargé sur cintre et en mettant le *tirant en tension* par tous moyens, les efforts se trouvant nécessairement centrés dans les sections par suite de la *stabilité de forme de l'arc*.

On obtient avec cette poutre le bras de levier maximum et l'état de contrainte le plus efficace.

#### IV. Conclusions

On voit, par cet ensemble d'études, qu'on peut exploiter plus encore les divers moyens dont on dispose pour utiliser au maximum la matière, et notamment par: Accroissement des qualités des matériaux, perfectionnement des moyens d'assemblage, meilleure distribution de la matière avec création de nouveaux profils, étude poussée des formes des poutres et des arcs, emploi du fil à haute limite élastique, réglage des contraintes.

Nous souhaitons que cette exploitation soit poursuivie pour contribuer au progrès de l'art de construire.

#### Résumé

L'auteur aborde l'étude de l'exploitation maximum des qualités des matériaux dans la construction.

Après avoir recherché les caractéristiques maximum de résistance des divers matériaux que l'on peut obtenir actuellement, il étudie la distribution la plus favorable de la matière dans la section pour résister aux efforts et les formes d'ensemble des ouvrages, qui permettent de tirer le meilleur parti des caractéristiques des matériaux.

Le mémoire comprend:

L'examen des plus grandes valeurs de contraintes supportables par les matériaux et de leur détermination sur éprouvettes.

L'étude des profils, des formes de poutres, et des dispositions des treillis les plus favorables. L'indication de profils spéciaux adaptés à la soudure électrique.

Le rappel de la nécessité d'une étude scientifique des arcs pour déterminer, dans chaque cas concret, le tracé, la forme de l'arc, et la contrainte à adopter.

L'étude des particularités des ouvrages précontraints, de l'emploi général du fil à haute limite élastique dans les constructions et de nouveaux modes de réglage des contraintes d'un ouvrage.

### **Zusammenfassung**

Es werden die Möglichkeiten zur besten Ausnützung der Materialeigenschaften im Bauwesen untersucht.

Nach der Ermittlung der größten heute erreichbaren Festigkeitseigenschaften der verschiedenen Baumaterialien, wird die für die Aufnahme der Beanspruchungen vorteilhafteste Verteilung des Baustoffes über den Querschnitt und die Gesamtanordnung der Bauwerke, die die beste Materialausnützung erlaubt, untersucht.

Die Abhandlung umfaßt:

Die Überprüfung der größten zulässigen Beanspruchungen und ihre Bestimmung an Probestäben.

Die Ermittlung der günstigsten Profile, Trägerformen und Fachwerk-Ausbildungen, die Angabe von Spezialprofilen für die elektrische Schweißung.

Den Hinweis auf die Notwendigkeit einer wissenschaftlichen Untersuchung der Bogen zur Bestimmung der Linienführung, Querschnittsform und zulässigen Spannungen in jedem praktischen Fall.

Die Untersuchung der Besonderheiten der vorgespannten Bauteile, der allgemeinen Verwendung von Drähten mit hoher Elastizitätsgrenze bei Bau-Konstruktionen und neue Methoden der Regulierung der Spannungen in einem Bauwerk.

### **Summary**

The possibilities of obtaining the best utilisation of the properties of material in structures is investigated.

After examining the greatest strength properties attainable today with various building materials, an investigation is made as to the most advantageous distribution of the material over the cross-section in order to take the stresses, and the total arrangement of the structure in order to give the best utilisation of material.

The treatment comprises:

Checking the greatest admissible stresses, and determining them on test pieces;

Determining the most favourable profiles, shapes of beams and types of lattice work; specifying special profiles for electric welding;

Pointing out the necessity of a scientific investigation of the arches in order to determine the run of the lines, the shape of cross-sections and the admissible stresses in each practical case;

Investigating the special features of pre-stressed structural parts, the general adoption of reinforcements with high elastic limits in building constructions, and new methods of regulating the stresses in a structure.