

Les outils de simulation : Le NUPUBEST de Christian RIECKHOF

Daniel TOUSSAINT
mars 2017

Le transfert, la reproduction et l'impression sont autorisés pour un usage strictement personnel et privé.

Pour toute autre utilisation, une autorisation préalable doit être demandée à: postmaster@linealis.org

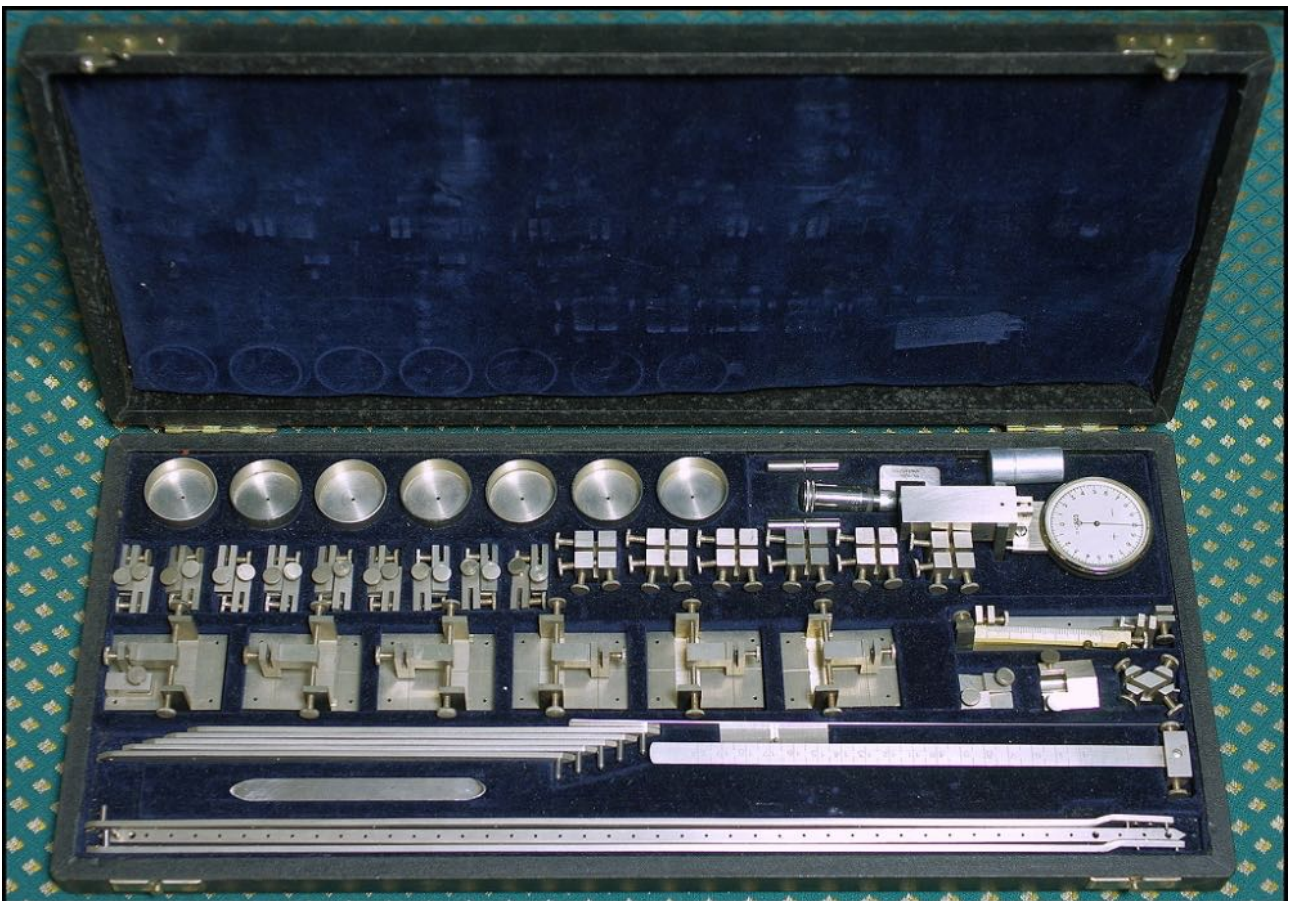
Les photographies sont propriété de l'auteur .

Les outils de simulation: une autre piste pour le calcul complexe.

Dans les années 2010, j'ai eu l'occasion d'acquérir un curieux coffret dont je ne connaissais ni la dénomination, ni l'usage - le vendeur non plus ! J'ai rapidement soupçonné qu'il devait être un outil de modélisation concernant l'architecture. J'ai lancé un appel à l'aide vers plusieurs collectionneurs que je connaissais, et l'un d'entre eux m'a indiqué que Andries de Man, collectionneur hollandais de grande réputation, était susceptible de connaître ce type de calculateur. Ce dernier a rapidement répondu à mon questionnement en m'orientant vers Otto Gottschalk et Christian Rieckhof. Enfin, j'ai pu identifier ce kit de calcul comme étant le Nupubest de Christian Rieckhof.

Le NUPUBEST de Christian RIECKHOF

48 x 21 x 4 cm environ, coffret en bois, toilé noir à l'extérieur et garni de velours bleu nuit à l'intérieur.



Le dictionnaire LAROUSSE définit ainsi l'hyperstatique :

Se dit d'un système de corps ayant entre eux plus de liaisons qu'il peut en exister entre solides indéformables. (Pour déterminer son équilibre, il faut faire intervenir les déformations élastiques de chaque corps.)

Se dit d'une structure pour laquelle on ne peut déterminer les sollicitations qui résultent d'un système de charges donné à partir des seules équations de la statique.

Dans le domaine de l'hyperstatique (étude du comportement des constructions en béton, pierre, fer, bois, soumises à des contraintes extérieures), le calcul direct était quasiment impossible, souvent des approximations successives étaient nécessaires, les connaissances en mathématiques et en physique indispensables pour y parvenir étaient peu souvent celles des architectes et ingénieurs qui devaient résoudre ces problèmes. La solution la plus pratique était de recourir à l'emploi de maquettes, encore maintenant des essais en soufflerie sont réalisés pour évaluer le comportement face au vent de certains ouvrages d'art. L'arrivée des ordinateurs, dans les années 70/80, avec des algorithmes performants, permet de faciliter ces calculs, qui restent cependant complexes.

La documentation sur le Nupubest, restait cependant très parcellaire, quelques articles en hongrois (A Magyar Mérnök), allemand (Der Bauingenieur, Deutsche Bauzeitung) et les nombreux brevets déposés par C. Rieckhof sur des sujets concernant l'architecture et la construction.

J'ai eu l'occasion de trouver un livre, daté de 1931, , aux éditions du "Constructeur de ciment armé", en français, rédigé par Paul CAROT et Christian RIECKOF qui constitue un manuel très complet sur le Nupubest (183 pages)

Il n'est pas possible de reproduire ce livre dans son intégralité, cependant l'avant-propos et les généralités, extraits de ce livre donnent des informations suffisantes pour la connaissance de ce type de calculateur. Les extraits qui suivent ont été obtenus par OCR des scans des pages concernées, il est possible que quelques fautes provenant du logiciel d'OCR subsistent. La mise en page originale n'a pas été conservée.

LA
STATIQUE EXPÉRIMENTALE
DES CONSTRUCTIONS CONTINUES

ÉTUDE ET RÉOLUTION, AU MOYEN DE MODÈLES RÉDUITS,
DES SYSTÈMES HYPERSTATIQUES

(MÉTHODE GÉNÉRALE, SIMPLE, APPLICABLE
AUX CONSTRUCTIONS EN BÉTON ARMÉ, EN MÉTAL,
EN BOIS, ETC.)

PAR

Paul CAROT,
Ingénieur des Constructions Civiles

et

Christian RIECKHOF,
Ingénieur-Conseil



ÉDITIONS DU "CONSTRUCTEUR DE CIMENT ARMÉ"

R. C. Seine 81.925

148, BOULEVARD DE MAGENTA, 148

PARIS 1931

Tous droits de reproduction et de traduction réservés pour tous pays.

AVANT-PROPOS

A l'heure actuelle, dans tous les domaines de la construction (qu'il s'agisse de constructions en béton armé, en métal ou en bois) on est amené, par la force des choses, à élever des édifices de plus en plus complexes, pour lesquels on cherche à tenir compte, aussi exactement que possible, des liaisons surabondantes existant entre leurs différents éléments. En un mot, on tend à serrer de plus en plus près le calcul des systèmes hyperstatiques.

On trouve à cela un double avantage :

D'une part, la connaissance aussi exacte que possible des efforts se produisant dans les différentes parties de la construction étudiée, permet en toute sécurité de faire travailler les matériaux dont on dispose à des taux aussi voisins qu'on le désire de leurs fatigues limites, ce qui permet de réaliser des économies appréciables.

D'autre part, les constructions ainsi étudiées présentent des coefficients de sécurité plus élevés que si elles avaient été calculées par des méthodes approchées plus simplistes, la répartition de la matière y étant faite d'après celle des efforts intérieurs réels. Le malheur est que le calcul des constructions hyperstatiques est en général compliqué et long, et fait ainsi perdre un temps précieux à l'ingénieur qui en est chargé. On peut dire que le temps qu'il y consacre est un temps mort, puisque seul le résultat final importe et que, plus simple sera la voie y conduisant, mieux cela vaudra, car les chances d'erreur seront diminuées dans la même proportion. On sait, en effet, combien il est facile, au cours d'un calcul absorbant et laborieux, de commettre une erreur de signe, de déplacer involontairement une virgule, d'intervertir deux chiffres, etc... Le résultat est que tout le calcul est à refaire - ce dont on ne s'aperçoit bien souvent que lorsqu'il est complètement terminé! Quand le temps presse et que le travail doit être fini dans un délai déterminé et rapproché, la nervosité s'empare du calculateur, augmentant encore les chances d'erreur. Quel ingénieur d'études n'a pas, au moins une fois dans sa vie, fait l'expérience de ce que nous avançons? De plus, la connaissance approfondie des méthodes de calcul des systèmes hyperstatiques suppose une culture scientifique et technique assez poussée, que ne possèdent pas tous les ingénieurs ; et l'on sait le danger que peuvent présenter, entre des mains malhabiles ou inexpérimentées, les formules toutes faites, extraites des aide-mémoire, qui sont souvent mal comprises et mal appliquées, et qui ne peuvent en tout cas prétendre épuiser tous les cas susceptibles de se présenter en pratique. En outre, même lorsqu'on les possède, il faut pour appliquer rapidement et sans chances d'erreur les méthodes de calcul des systèmes hyperstatiques, les pratiquer pour ainsi dire journallement. Sinon, il faut à l'occasion de chaque calcul effectué de loin en loin se les remettre en mémoire, ce qui prend du temps et nécessite un travail préliminaire supplémentaire. Enfin, dans les conditions courantes de la pratique, un calculateur, même très exercé et très sûr, n'a jamais le temps matériel de

pousser à fond l'étude des variantes pouvant se présenter à son esprit, ni de les chiffrer. Il ne peut pas, par conséquent, être certain d'avoir adopté le parti le meilleur et le plus économique. Ces considérations expliquent pourquoi l'emploi de la méthode expérimentale - qui a fait brillamment ses preuves dans d'autres branches du savoir - était particulièrement souhaitable dans le domaine des constructions hyperstatiques, soit pour permettre de vérifier rapidement les résultats fournis par le calcul, soit pour obtenir directement les valeurs cherchées des inconnues hyperstatiques.

A notre connaissance, la première application de la méthode expérimentale à la statique des constructions a été réalisée à l'aide de modèles réduits en verre, par M. le professeur Mesnager, membre de l'Institut. Avec ces modèles il a pu étudier et déterminer complètement les tensions qui se produiront dans les ouvrages en vraie grandeur, et cela en utilisant le procédé dit de la photo-élasticimétrie, basé sur le phénomène de la double réfraction accidentelle prise par les substances transparentes soumises à des efforts (1).

Voici les principes de mécanique sur lesquels repose sa très ingénieuse méthode (2) :

Si un modèle est semblable à l'ouvrage, de même matière, et que ses dimensions soient dans le rapport $1/\lambda$ avec celles de l'ouvrage, il suffit de multiplier les forces que doit supporter cet ouvrage par $1/\lambda^2$ avant de les appliquer au modèle, pour avoir les mêmes tensions en chaque point. En effet, toutes les forces restent alors dans le même rapport avec les sections, les pressions sont les mêmes aux points homologues; les déformations, quelles que soient leurs lois, restent les mêmes par unité de longueur, et les déformations totales des pièces sont dans le rapport de similitude. Si l'on ne dépasse pas la limite de proportionnalité des déformations aux tensions, on pourra changer la matière du modèle sans changer la distribution des tensions. En effet, tant que l'on reste au-dessous de cette limite :

1° Si l'on multiplie les forces par un même facteur, les tensions et les déformations soit linéaires, soit angulaires sont multipliées par ce même facteur (c'est le cas général de toutes les formules de la résistance des matériaux et de la théorie de l'élasticité).

2° Si l'on change la matière, on change le seul coefficient d'élasticité E qui entre dans les formules, et l'on obtient le même résultat, au point de vue des déformations, que si l'on multipliait toutes les forces par un même nombre.

L'emploi des modèles trouve donc dans ces principes sa complète justification théorique. La seule difficulté du problème, tel que M. Mesnager l'avait abordé, consistait dans la mesure des tensions. Il l'a très ingénieusement résolue en utilisant la lumière polarisée et en employant le compensateur Babinet-Jamin pour la mesure des tensions (3).

Mais ce procédé, si ingénieux soit-il, reste un procédé de laboratoire, et non un procédé de bureau d'études, à cause des instruments de précision qu'il nécessite et des mesures délicates auxquelles il donne lieu. De plus, les modèles qui doivent être taillés dans des lames de verre sont d'un prix assez élevé, et doivent être renouvelés pour chaque forme nouvelle de construction étudiée.

Procédé de laboratoire également, que celui, un peu différent, imaginé par M. le professeur Beggs, de l'Université de Princeton (N. J.), et qui repose sur l'emploi du théorème de réciprocité de Maxwell pour l'obtention des lignes d'influence des inconnues hyperstatiques. Les très petites déformations qu'utilise ce procédé nécessitent l'emploi de microscopes micrométriques pour leur mesure, qui est par suite assez délicate.

C'est à M. Gottschalk, ingénieur civil à Buenos-Ayres, que l'on doit l'idée d'employer, pour l'étude des modèles réduits, de grandes déformations faciles à examiner à l'oeil nu et à mesurer à l'aide d'un simple décimètre. Idée féconde qui, reprise et développée par l'un de nous, lui a permis de créer un appareil véritablement pratique et d'un emploi simple, destiné à pouvoir être utilisé par tous les ingénieurs ou les bureaux d'études (4).

Bien entendu, l'emploi de cet appareil trouve sa complète justification théorique dans les principes que nous avons exposés ci-dessus, à propos de la méthode de M. Mesnager. Mais - et c'est là un de ses principaux avantages - il n'exige aucune mesure de forces ni de tensions, opérations toujours délicates : de simples mesures de longueurs, effectuées au décimètre, suffisent. Il met, en un mot, la statique expérimentale à la portée de tous les bureaux d'étude. En matérialisant les systèmes étudiés, il permet d'y suivre le jeu des forces qui s'y exercent : l'ingénieur, ayant sous les yeux l'image de tous les déplacements, de toutes les déformations ou déviations que peuvent subir les éléments de la construction qu'il projette d'établir, ne peut pas commettre d'erreurs sur le sens et la grandeur de ces déplacements ou déformations, ni sur le sens d'action des moments, leur valeur absolue, leur répartition, leurs rapports respectifs, etc. Il ne faut d'ailleurs pas considérer cet appareil comme un moyen purement mécanique permettant de résoudre automatiquement les systèmes hyperstatiques à la façon dont une machine à calculer effectue les opérations arithmétiques, ou un planimètre donne la surface d'une courbe fermée. Il permet, au contraire, en quelque sorte, une mise en oeuvre animée des principes de la mécanique et de la statique des constructions, qu'il rend plus clairs et plus compréhensibles et qu'il permet d'approfondir. En matérialisant certaines notions assez abstraites, comme celle des lignes d'influence, par exemple, il peut rendre de grands services dans l'enseignement de la résistance des matériaux. Il donne enfin à l'ingénieur d'études, obligé en ces derniers temps, de par sa fonction et son travail mêmes, d'être de plus en plus un calculateur, la possibilité de recourir à l'expérience,

toujours instructive et féconde, soit pour contrôler ses calculs, soit pour effectuer des recherches originales sur de nouvelles formes constructives. Bien entendu, les principes de la statique expérimentale des constructions continues peuvent être mis en oeuvre, indépendamment de l'appareil

que nous avons signalé ci-dessus, au moyen de modèles réduits improvisés que chacun peut construire avec un peu d'ingéniosité. Il est facile, par exemple, de réaliser des modèles réduits au moyen de petites tiges de bois planes et minces, bien dressées, présentant une section rectangulaire; la jonction de ces pièces deux à deux serait effectuée en les fixant à l'aide de petites vis sur les tranches de pièces d'angle, également en bois, découpées de façon à présenter exactement l'angle que doivent faire les pièces entre elles. Les noeuds où se croisent plus de deux barres s'obtiendraient d'une façon analogue en fixant, à l'aide de vis, ces barres sur de petites plaques de bois formant goussets d'assemblages, etc... .

Mais ces modèles réduits en bois, si on voulait leur donner une certaine solidité et une certaine résistance, ne présenteraient pas toute l'élasticité requise ; de plus, le bois n'est pas une matière particulièrement homogène. On obtiendrait de meilleurs résultats, sans nul doute, en faisant usage de lames métalliques minces et flexibles, pour réaliser les modèles réduits. (Test ce qu'a fait M. P. Santo-Rini, ingénieur-conseil à Athènes, pour l'étude des bâtiments industriels destinés à la distillerie "Kronos", à Eleusis, près d'Athènes (5).

Afin de vérifier les calculs d'un portique complexe à trois travées, dont la travée centrale (surélevée par rapport aux deux travées extrêmes formant appentis), présentait trois étages, il en construisit un modèle réduit, en lames d'acier, dont il étudia et interpréta les déformations. C'est là un intéressant exemple d'application de la méthode expérimentale.

Un autre procédé pratique de construction des modèles réduits est celui que M. Anders Bull a indiqué dans l'Engineering News Records du 8 décembre 1927, au cours d'un article intitulé : Brass Wire Models used to solve Indeterminate Structures. Il consiste à faire usage de fils de laiton demi-durs, obtenus par tréfilage; d'après l'auteur, ces fils présentent les avantages suivants :

1° On les trouve facilement dans le commerce, en barres bien droites d'un yard de longueur (0 m. 90 environ) et avec une grande variété de diamètres ;

2° Étant obtenus par tréfilage, ces barres sont bien homogènes, leur section et leurs propriétés élastiques restent constantes sur toute la longueur ;

3° Ces fils peuvent être soudés, ce qui facilite leur assemblage. Les assemblages rigides sont réalisés à l'aide de petites plaques, découpées dans des feuilles de laiton, et sur lesquelles les fils sont soudés. Les joints articulés sont réalisés au moyen de

deux plaquettes dont l'une (la plaquette supérieure) est percée d'un trou, et dont l'autre (la plaquette inférieure) porte un tourillon constitué par un clou de cuivre qui est soudé sur elle. Les appuis articulés sont obtenus en soudant à la base de la tige une plaquette percée d'un petit trou : une épingle piquée dans la planche à dessin, et traversant ce trou, constitue l'axe de l'articulation. Pour réaliser les appuis encastrés, au contraire, les plaquettes correspondantes sont percées de deux ou de plusieurs trous : des punaises, traversant ces trous, et piquées dans la planche à dessin, empêchent tout déplacement des appuis ainsi constitués, etc.

Comme on le voit, la construction des modèles réduits est chose relativement facile : elle nécessite seulement un peu d'ingéniosité et d'habileté. Mais les résultats que l'on peut obtenir avec ces modèles de "fortune" (sauf, peut-être, avec ceux construits en fils de laiton) sont plutôt qualitatifs que quantitatifs, en ce sens, qu'ils donnent bien l'allure générale des déformations d'ensemble de la construction, mais qu'ils ne permettent pas d'effectuer de celles-ci des mesures de précision. Par suite, les résultats obtenus avec eux ne sont pas d'une très grande rigueur.

De plus, pour leur construction, un petit outillage est nécessaire, ainsi qu'une certaine habileté manuelle, que chacun peut ne pas posséder ; enfin, il est difficile de réutiliser les éléments ayant déjà servi à la confection d'un modèle. C'est pour obvier à tous ces inconvénients que l'appareil Nupubest a été spécialement créé. Il apporte à la réalisation et à l'expérimentation des modèles réduits une telle simplification et un tel degré de rigueur, les résultats qu'il donne sont d'une telle précision que nous ne saurions trop en recommander l'emploi. C'est pourquoi, dans tout ce qui va suivre, nous nous référerons constamment à son utilisation, et pourquoi il nous servira à exposer les principes théoriques et les applications de la statique expérimentale. Souhaitons, en terminant, que la méthode expérimentale, développée dans cette brochure, soit utile aux ingénieurs d'étude et de contrôle, en facilitant leur tâche, en leur faisant gagner un temps précieux et en leur évitant des calculs compliqués et absorbants, tout en les mettant à l'abri de l'erreur et en leur permettant de réaliser des économies (dans les projets qu'ils dresseront ou vérifieront avec son aide.

(1) Voir Annales des Ponts et Chaussées, fascicule 5, 1913, p. 133 et suiv.

(2) MESNAGER, Cours de Béton armé, p. 221.

(3) Voir Annales des Ponts et Chaussées, 1913, article cité.

(4) Le Nupubest, de Rieckhof, breveté en France et à l'Etranger.

(5) Voir Beton und Eisen du 20 janvier 1925.

GÉNÉRALITÉS

La construction à étudier est d'abord dessinée, à échelle réduite, sur une feuille de papier bien lisse, tendue sur une planche à dessin disposée horizontalement. On construit alors sur ce schéma, suivant le procédé qui sera indiqué ci-après, et à l'aide des éléments constituant l'appareil Nupubest (1) un modèle réduit du système à

expérimenter, modèle dont les différentes pièces doivent posséder des moments d'inertie proportionnels à ceux des pièces correspondantes du système, et dont les différents nœuds et appuis doivent être de même nature que ceux de la construction à réaliser. Il est à remarquer d'ailleurs (voir à ce propos les principes rappelés page 7 à l'occasion de la méthode de M. Mesnager) que l'échelle de réduction $1/t$ des moments d'inertie peut être différente de celle des longueurs $1/\lambda$ et indépendante de celle-ci.

Bien entendu, les plaques de base des pièces constituant les appuis doivent être solidement fixées sur la planche à dessin de façon à ne pas subir de déplacements intempestifs. Rien ne doit par contre empêcher ou gêner le mouvement des autres éléments figuratifs des pièces de la construction qui sont mobiles dans l'espace. Le modèle réduit ainsi obtenu peut alors être étudié par deux méthodes entièrement différentes : la première basée sur l'emploi de la fibre moyenne déformée, la seconde fournissant les lignes d'influence des différentes inconnues hyperstatiques cherchées. Dans le premier cas, en exerçant une traction en un point convenablement choisi du modèle, on fait agir une force extérieure produisant la déformation de ce modèle; dans le second, on introduit une réaction intérieure au système, qui le déforme suivant la ligne d'influence cherchée.

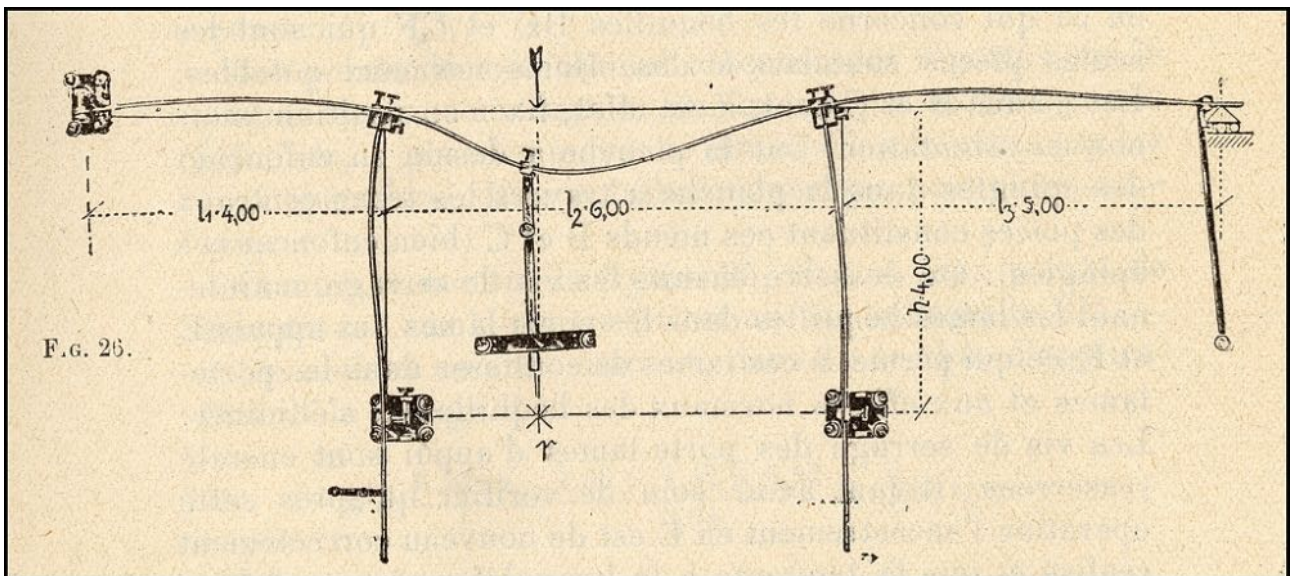
Comme il a été expliqué ci-dessus, les déformations avec lesquelles on opère sont grandes : ce sont des déformations finies au lieu des déformations infiniment petites qui servent de base au calcul et se produisent dans les constructions réelles. Les irrégularités ou les erreurs qui pourraient résulter de l'emploi de ces déformations finies sont éliminées automatiquement si l'on a soin de faire toutes les déterminations au moyen de deux expériences successives, dans lesquelles on produit les déformations dans deux sens opposés.

Les causes d'erreurs qui, dans le premier cas, agissaient par exemple dans le sens positif, agiront, dans la seconde expérience, suivant le sens négatif : en prenant la moyenne des deux résultats obtenus, on élimine, par conséquent, l'erreur possible. Les irrégularités qui pourraient se produire du fait de quelques petites imperfections des matériaux servant à la construction du modèle se trouvent éliminées de la même façon. La méthode de la fibre moyenne déformée et celle des lignes d'influence étant fondamentalement différentes, seront étudiées successivement et séparément.

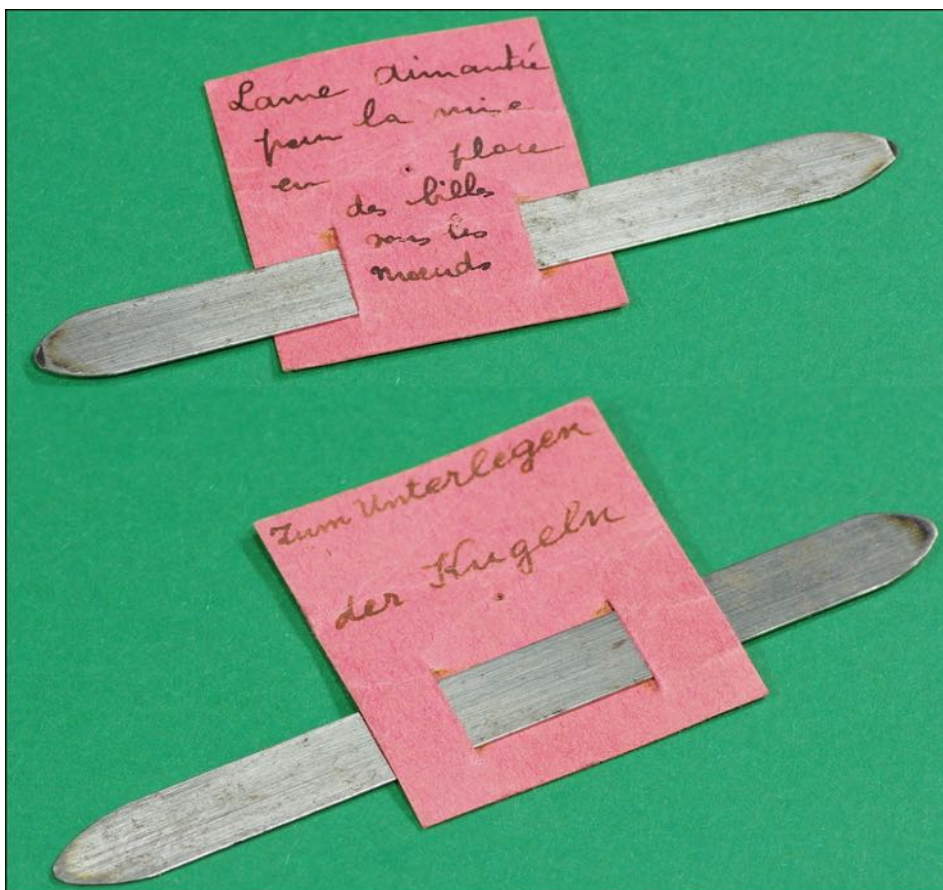
(1) Le nom de l'appareil est l'abréviation de l'indication de la méthode Nullpunktbeslimmungen (Détermination des points de moment nul).

Voici quelques gravures extraites du manuel avec les photos des accessoires correspondants.

Utilisation du Nupubest



Les seules informations écrites qui figuraient dans le coffret : la lame aimantée qui servait à la manipulation des billes.



Quelques gravures extraites du manuel et quelques photographies.

appuis

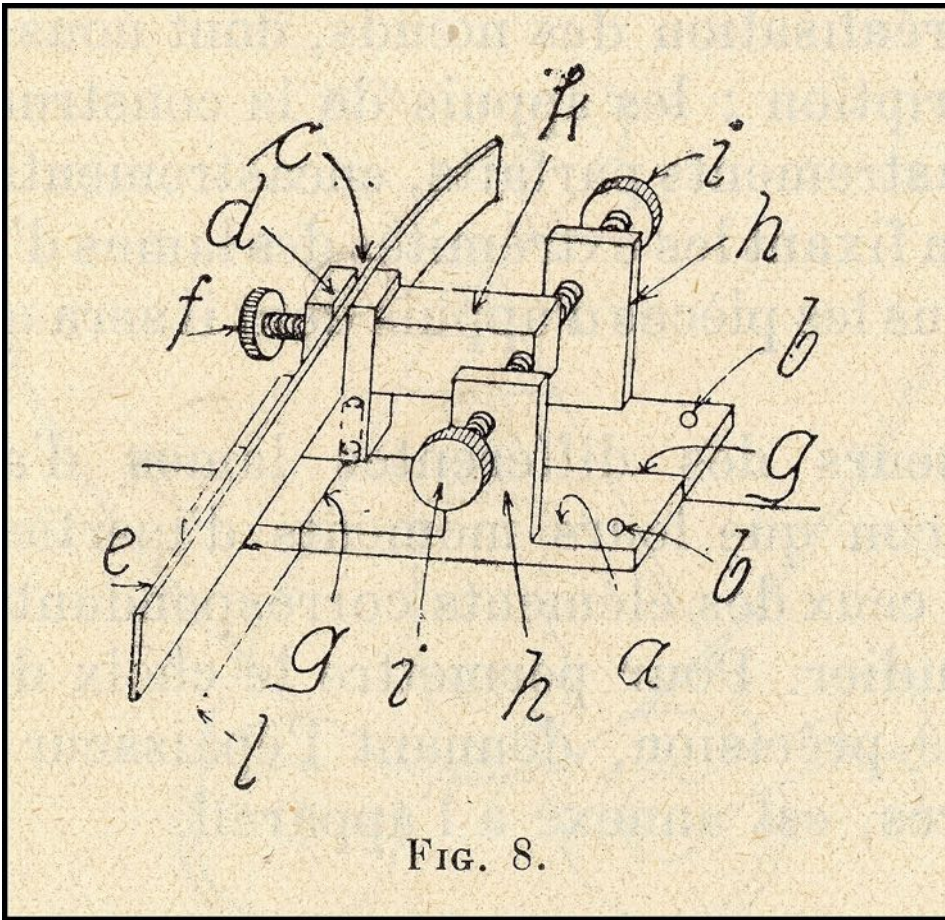


FIG. 8.

pincettes de déformation

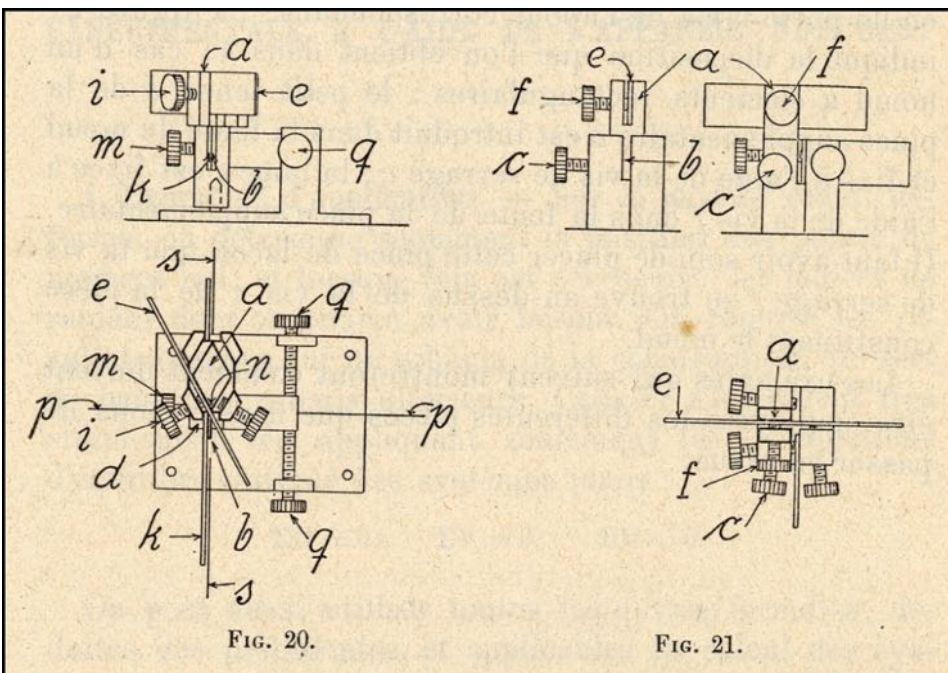
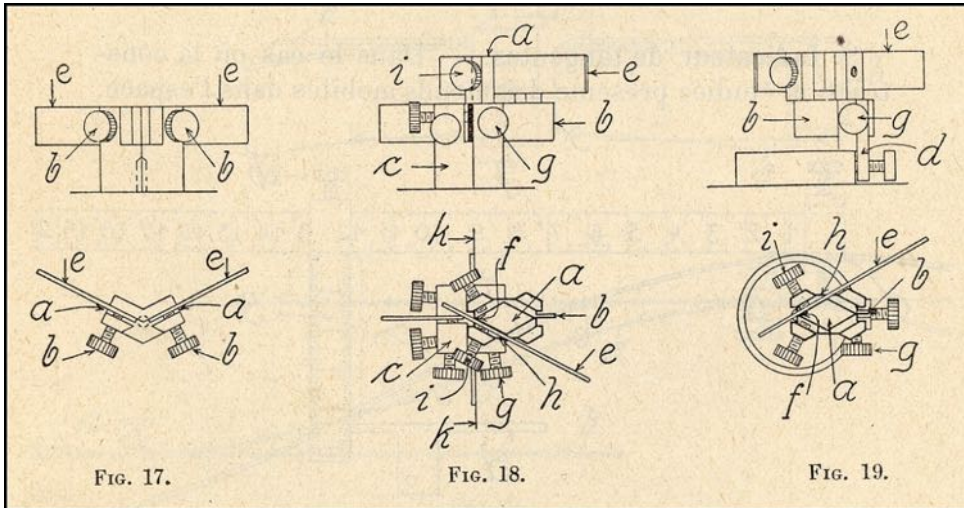
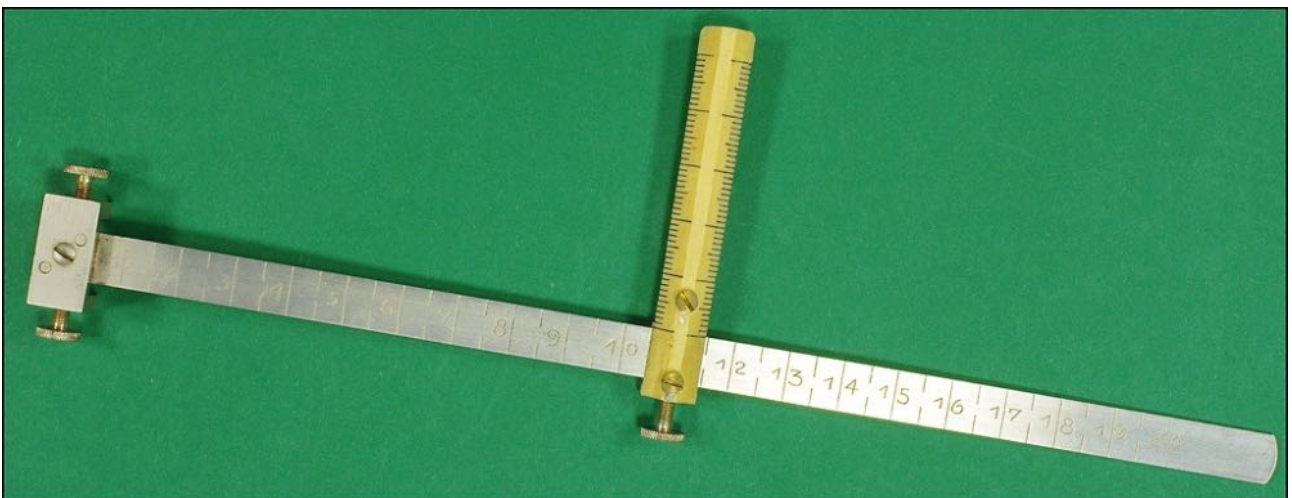
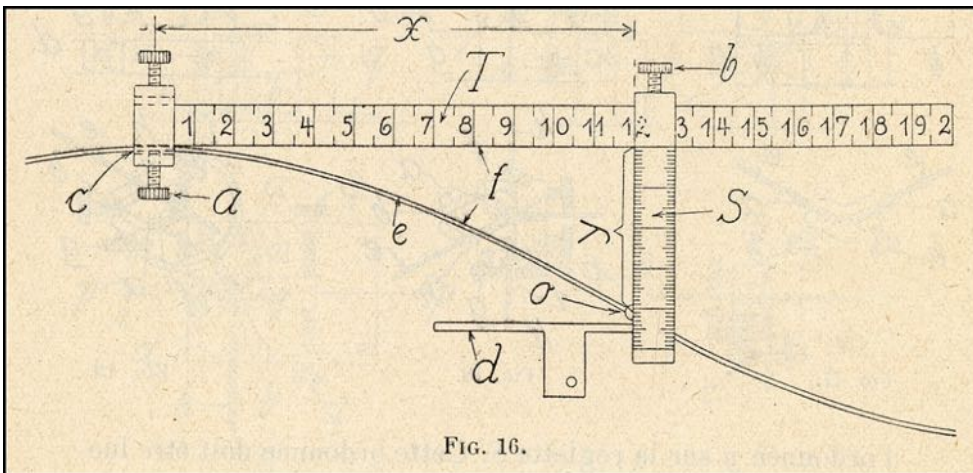


FIG. 20.

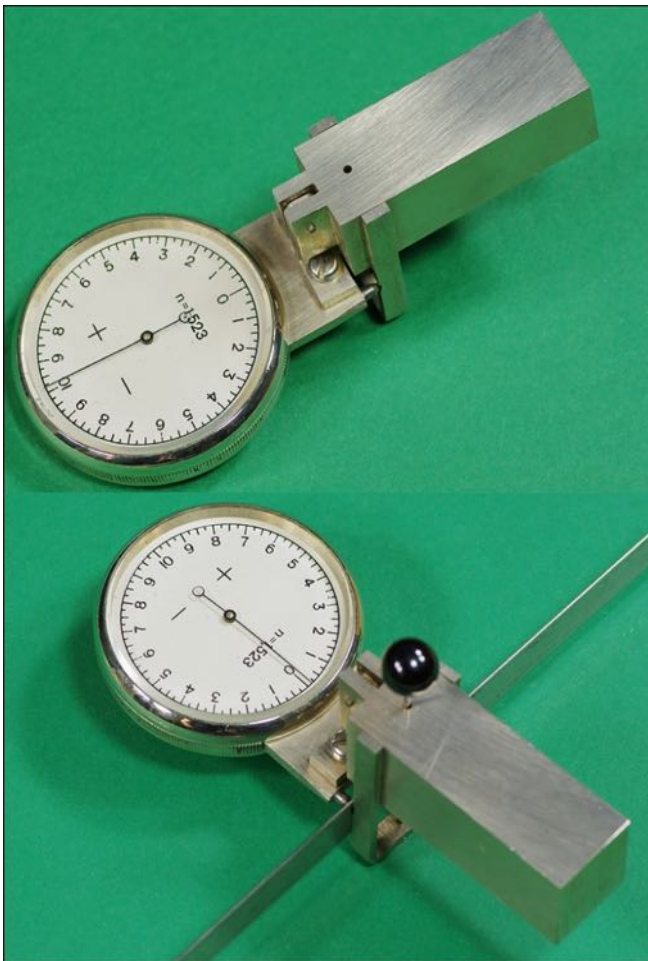
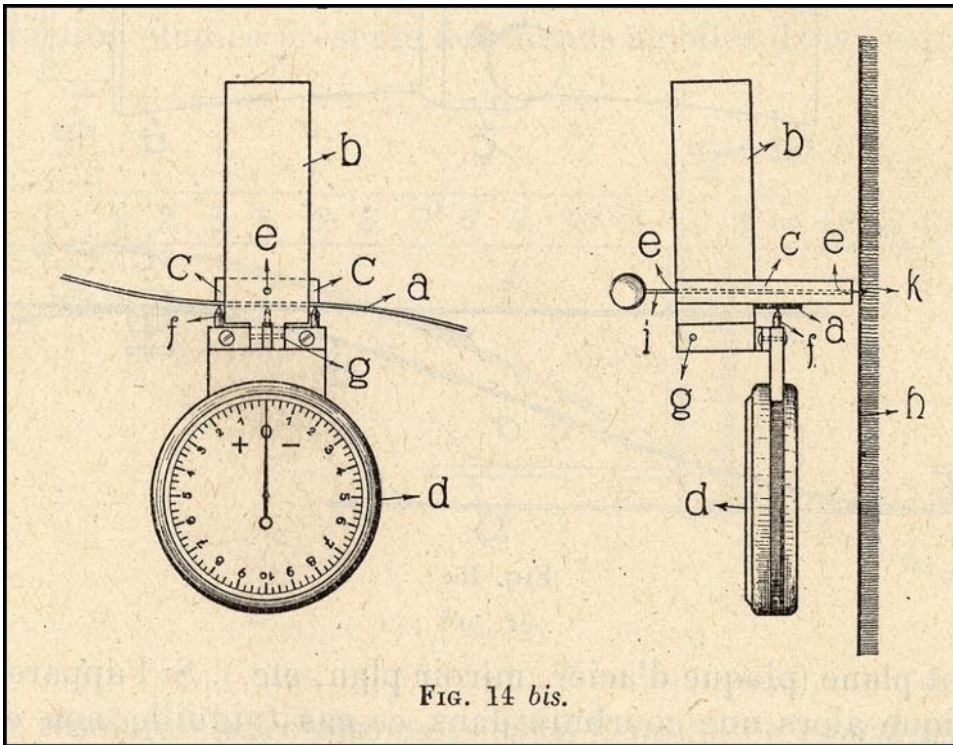
FIG. 21.



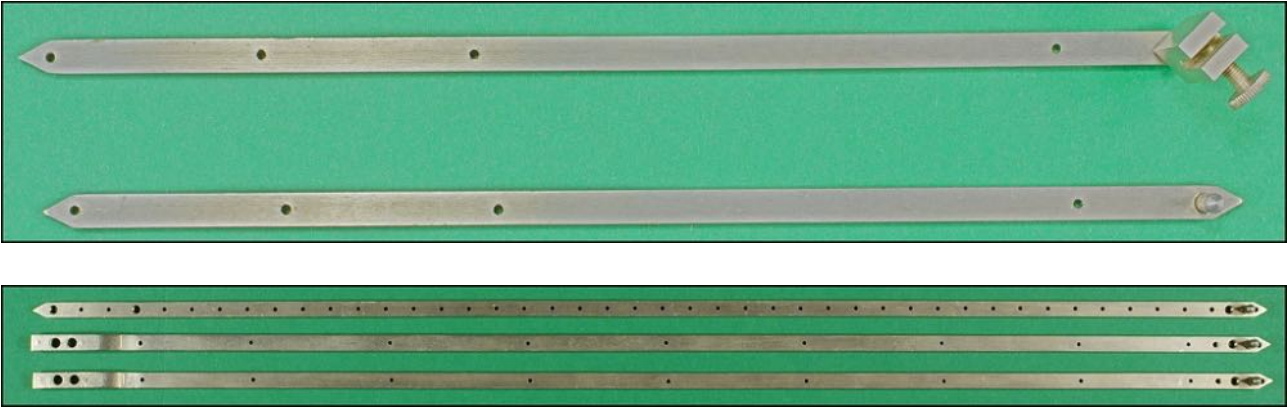
indicateur de tangentes



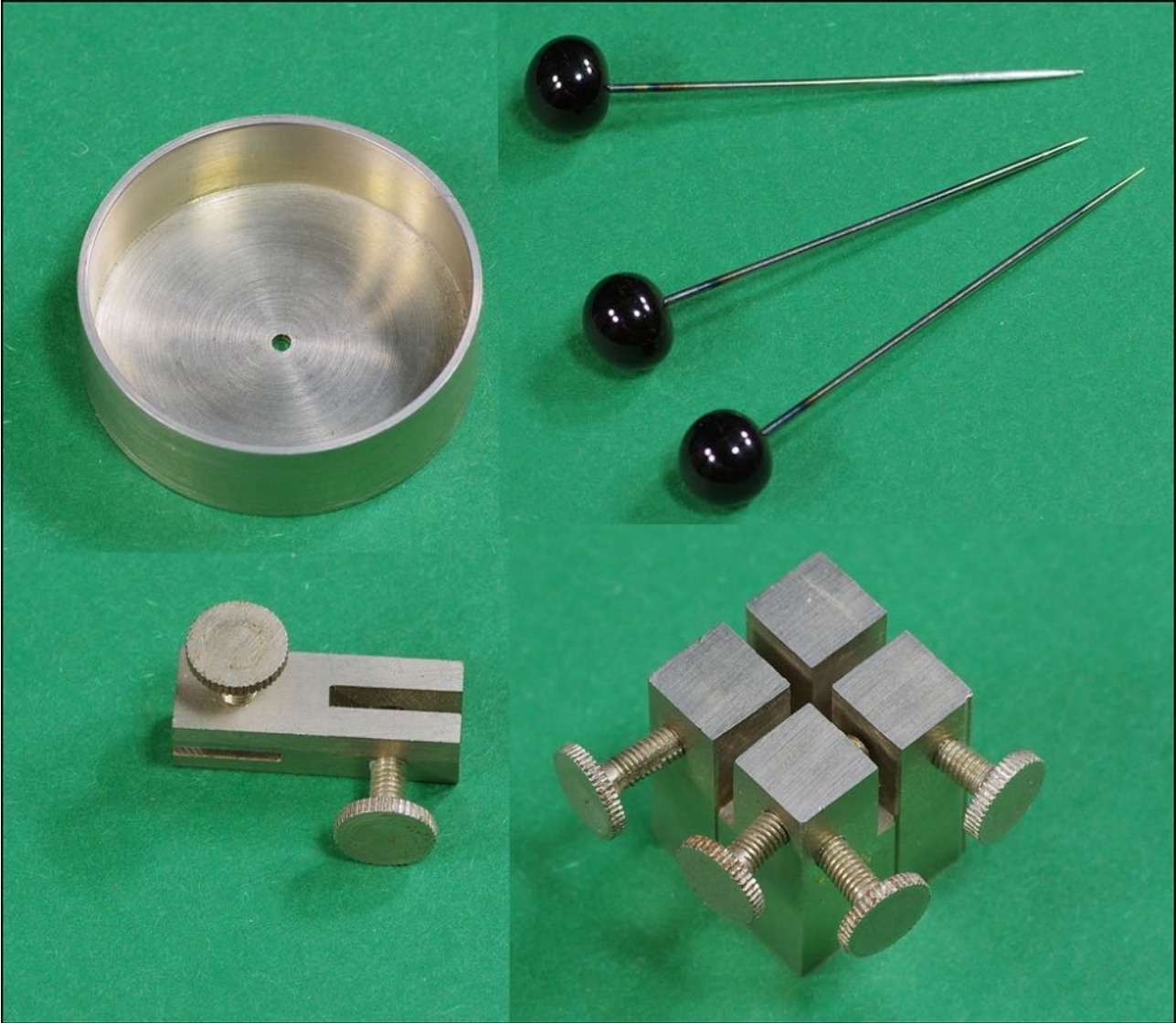
curvimètre

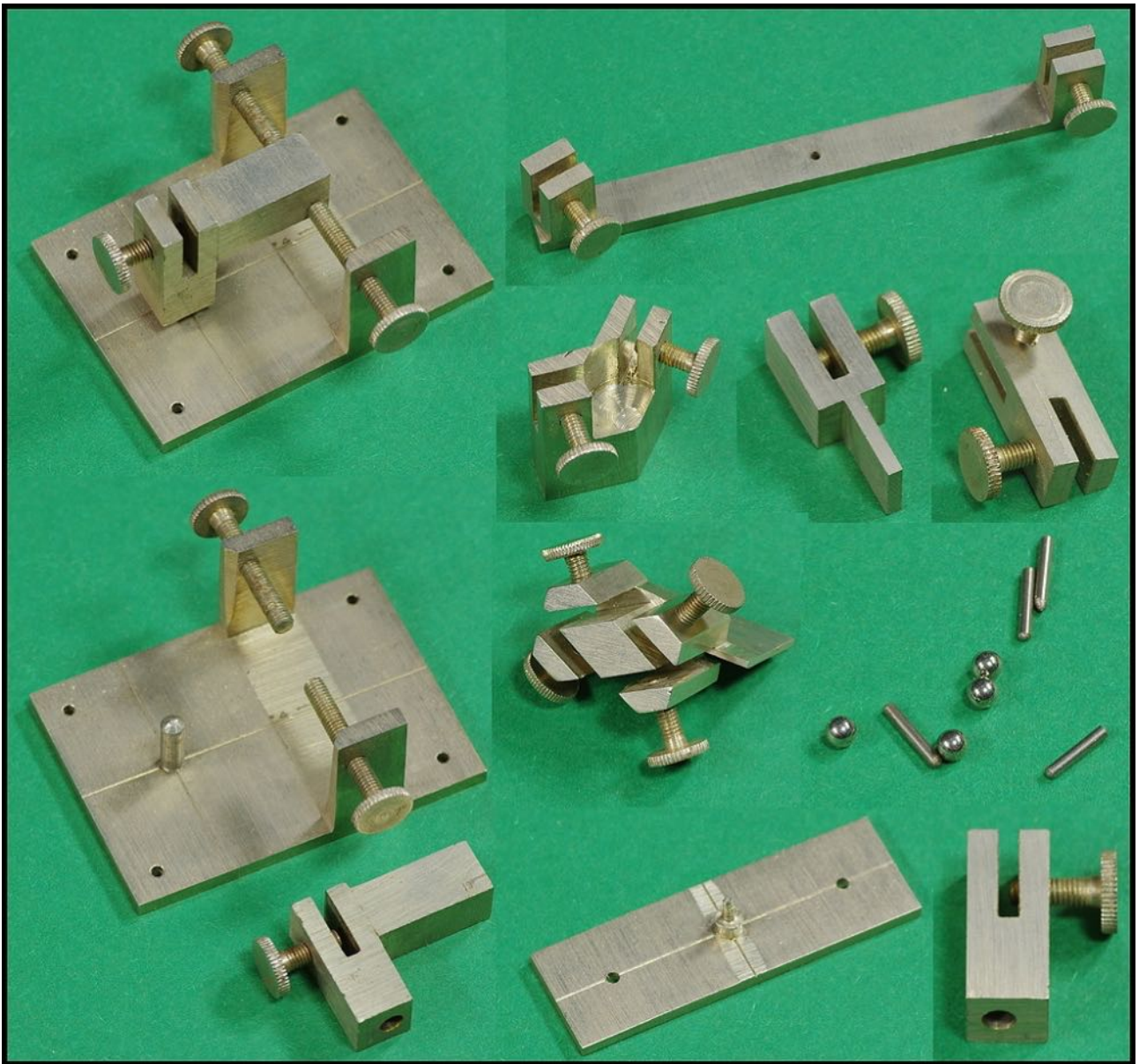


Les tiges d'action servant à définir les déformations



Quelques accessoires





Le palmer servant à mesurer l'épaisseur des lames d'acier



Bibliographie sommaire :

Andries de MAN – NuPuBest and EfluBest, IM 2014 Proceedings

Paul CAROT et Christian RIECKHOF - La statique expérimentale des constructions continues, Constructeur du ciment armé, 1931