

ASSOCIATION INTERNATIONALE DES PONTS ET CHAR. (36)
INTERNATIONALE VEREINIGUNG FÜR BRÜCKENBAU UND HOCHBAU
INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR BRIDGE AND STRUCTURAL ENGINEERING

TROISIÈME CONGRÈS
DRITTER KONGRESS
THIRD CONGRESS
LIÈGE – 13-18 SEPTEMBRE 1948

**Analyse de la notion de sécurité
et sollicitations dynamiques
des constructions**

Begriff der Sicherheit
und dynamische Beanspruchung von Bauwerken
Analysis of safety and effect of dynamic forces

F. CAMPUS
Professeur à l'Université de Liège

TIRAGE A PART EXTRAIT DU « RAPPORT FINAL »
SONDERDRUCK AUS DEM « SCHLUSSBERICHT »
REPRINTED FROM THE « FINAL REPORT »

V

Analyse de la notion de sécurité et sollicitations dynamiques des constructions

Complément au Rapport général ⁽¹⁾

Begriff der Sicherheit und dynamische Beanspruchung von Bauwerken

Ergänzung zum Generalreferat ⁽¹⁾

Analysis of safety and effect of dynamic forces

Supplement to General Report ⁽¹⁾

F. CAMPUS

Professeur à l'Université de Liège

1. Analyse de la notion de sécurité

Grâce aux bons soins du Secrétariat de l'Association et du Comité d'organisation du Congrès, les rapports sont parvenus aux congressistes il y a presque deux mois. Ceux d'entre eux qui en ont eu le désir et le loisir ont pu prendre connaissance du rapport général et des rapports concernant l'analyse de la notion de sécurité. Je n'en exposerai donc pas ici un résumé; ce serait d'ailleurs très difficile eu égard au caractère encyclopédique de la question.

Ainsi que je l'ai écrit, ma tâche de rapporteur général a été singulièrement facilitée par le caractère fondamental et la qualité des rapports particuliers; j'en remercie et j'en félicite sincèrement leurs auteurs. Particulièrement les rapporteurs français, dont le travail d'équipe est exemplaire et mérite d'être imité sur le plan international. Plutôt que de faire l'analyse ou la paraphrase de ces rapports, ce qui eût été presque les trahir, j'ai préféré suggérer que l'étude de ces rapports devait précéder celle du rapport général et j'ai consacré celui-ci à une large revue de la question, fondée non seulement sur les contributions préliminaires au Congrès, mais aussi sur celles faites aux Congrès précédents, depuis Vienne

⁽¹⁾ Voir *Publication Préliminaire*, p. 555. — Siehe *Vorbericht*, S. 555. — See *Preliminary Publication*, p. 555.

en 1928, et sur les publications faites dans les volumes des *Mémoires* de l'Association.

En raison de la nature même de la question, on ne décèle pas dans cette revue de faits nouveaux très saillants. Le plus particulier semble être une attention plus importante accordée entre les Congrès de Vienne et de Berlin à la réserve de sécurité résultant de la ductilité de la matière dans le cas de sollicitations non homogènes ou hyperstatiques; cependant les fondements de cette question étaient connus depuis des dizaines d'années. On remarque plutôt un lent travail s'effectuant partout et qui semble tendre vers une uniformisation universelle des notions et des concepts, prélude à une éventuelle unification des prescriptions. Dans ce domaine, même les plus sceptiques quant à l'utilité réelle de la collaboration technique internationale devront reconnaître une certaine efficacité à son action. L'Association internationale des Ponts et Charpentes a contribué, avec d'autres groupements internationaux de caractère purement intellectuel, à une évolution qui aura préparé le terrain et facilité la tâche des organismes tels que l'I. S. O., qui disposent de pouvoirs pré-exécutifs. Vis-à-vis d'un tel organisme, notre groupement se distingue par un caractère exclusivement scientifique, académique en quelque sorte. Cependant, c'est dans nos travaux que devront nécessairement être puisés les principes d'une éventuelle codification internationale de la sécurité des Ponts et Charpentes. Nous pouvons donc efficacement contribuer à sa préparation en confrontant les idées diverses, dans le souci d'en dégager celles qui peuvent être unanimement admises plutôt que de faire triompher des idées personnelles.

Il y a quelques jours, lors de la séance du Comité permanent, la question de la collaboration de l'A. I. P. C. à l'U. N. E. S. C. O. a été évoquée. Je me permets de suggérer qu'une liaison avec l'I. S. O. paraît plus directement appropriée aux buts de l'A. I. P. C.

J'ai rappelé dans le rapport général une opinion exprimée à Vienne en 1928 selon laquelle la notion du coefficient de sécurité n'avait pas de sens réel. Ce n'est pas pour compenser ce point de vue par un autre paradoxe, mais pour exprimer une conviction sérieuse que j'exprimerai ici ce qui est, en somme, la conclusion implicite de mon rapport général, que l'analyse de la notion de sécurité conduit à considérer celle-ci comme la synthèse de toutes les activités du constructeur. En effet, cette notion dépend sans exception possible :

- 1° De la conception et de l'économie;
- 2° De la nature des sollicitations;
- 3° De la nature et de la qualité des matériaux;
- 4° Du calcul et du dessin;
- 5° De l'exécution;
- 6° De l'entretien et de l'exploitation.

Tous ces points correspondent à des responsabilités différentes. L'idéal pour la sécurité est de les réunir toutes, sauf partiellement celles du dernier point, où c'est moins nécessaire, bien que ce soit toujours favorable. Mais la complication des organisations administratives conduit souvent à la séparation de ces responsabilités, sans que les chefs puissent effectivement, comme il le faudrait, assurer une supervision suffisante. Il peut résulter de là une réelle insécurité et, pour la réduire, il serait utile, dans

bien des cas, de créer une instance de contrôle constituant un service de la sécurité.

Je ne m'étendrai guère sur la conception et l'économie; j'en ai souligné l'importance essentielle dans le rapport général. Les deux points de vue de sécurité et d'économie ne peuvent être assurés que par une conception intelligente. La sollicitation homogène, notamment en compression, doit retenir spécialement l'attention : les arcs et les voûtes satisfont particulièrement aux conditions de sécurité et d'économie.

La nature des sollicitations est plus ou moins aléatoire, sauf éventuellement pour certains cas de pressions hydrostatiques ou autres, où elle peut avoir des valeurs constantes ou maxima bien connues ou limitées. On fait remarquer à juste titre que les sollicitations aléatoires relèvent de l'observation statistique et cette observation est nécessaire partout où elle est possible. Le vœu de M. R. Lévi concernant les observations statistiques sur les caractères et les effets du vent trouvera sans doute l'adhésion unanime du Congrès comme il reçoit mon accord entier, car il correspond à une opinion que j'ai formulée dès le début des travaux de la Commission sur les effets du vent en Belgique.

Les contributions au thème III du Congrès relatives au pont de Menai mettent en évidence l'importance de ces effets.

La sécurité est influencée considérablement par le choix des matériaux, mais celui-ci peut recevoir d'importantes limitations, en raison de circonstances indépendantes. Il faut nécessairement pouvoir construire en sécurité avec les matériaux dont on dispose. Quant à la qualité des matériaux, quels qu'ils soient, elle est variable ou aléatoire. Les essayeurs de matériaux ont depuis longtemps adopté les méthodes statistiques. Les utilisateurs et les rédacteurs des cahiers des charges et des prescriptions semblent seulement s'orienter maintenant vers une compréhension satisfaisante de la notion statistique de la qualité des matériaux, grâce à l'action d'ingénieurs qui, tels M. Prot, ont pu établir une liaison entre l'essai et l'utilisation des matériaux. Je ne doute pas que l'exploitation des notions de statistique et de probabilité sera très utile pour rendre plus saine et plus précise la notion de sécurité dans la mesure où elle dépend de la qualité des matériaux. Pour ma part, j'ai toujours déploré que les prescriptions de qualité soient souvent dépourvues d'indications de tolérances ou de dispersion.

Les observations faites sur des ouvrages datant de quelques dizaines d'années montrent qu'ils n'ont pas toujours été établis avec un souci suffisant de durabilité ou de protection des matériaux contre les dégradations. Cela est en rapports étroits avec la sécurité, bien que pas souvent exprimable en chiffres. Les contributions au thème III concernant le pont de Menai signalent l'importance des moyens de préservation.

Pour ce qui est du calcul, je crois que leur incidence sur la sécurité est souvent appréciée d'une manière illusoire. Dans son rapport à ce Congrès sur les échecs dans la construction soudée, M. l'Inspecteur général De Cuyper écrit en introduction : « Les échecs ne sont pas dus à des erreurs de calcul. » A vrai dire, il faut comprendre cela comme suit, c'est qu'il n'y a pas eu d'erreurs dans ce qu'on a calculé selon la conception classique et assez conventionnelle des calculs, mais les échecs sont précisément provenus de ce que l'on n'a pas calculé ou de ce dont les calculs n'ont pas tenu compte. Dans un cas d'accident d'une construction rivée, qui avait été calculée avec toutes les garanties voulues, c'est un gousset qui s'est

rompu et qui n'avait pas été calculé. Un grand pont suspendu, qui avait certes été calculé selon les règles de l'art, s'est catastrophiquement rompu lors des essais, par suite de l'insuffisance des étriers d'attache des suspentes à la poutre de rigidité. Mon éminent collègue M. Stüssi, rapporteur général de la question I, remarque avec pertinence, en tête de l'introduction à son rapport général, que rarement les échecs résultent d'une erreur de conception d'ensemble (y compris évidemment le calcul), mais bien des dispositions erronées ou de dimensions insuffisantes d'éléments de détail. Je partage entièrement cette opinion, surtout en ce qui concerne les constructions métalliques. En fait, la même possibilité existe pour le béton armé et davantage encore pour le béton précontraint, mais les éléments de détail sont moins nombreux ou moins apparents et il est aussi arrivé plus souvent, pour le béton armé, que l'on ait eu affaire à de mauvais calculateurs, en raison de circonstances diverses inhérentes à l'évolution du matériau.

La formation et les goûts de l'ingénieur et une éventuelle facilité de l'outil mathématique illusionnent certains sur l'importance primordiale des calculs sur la sécurité. Au delà d'un certain point, cela devient plutôt une vanité qu'une réalité. Il importe beaucoup moins d'avoir effectué de savants calculs pour certaines parties de la construction, qualifiées arbitrairement de principales, que de n'avoir oublié la vérification, au besoin élémentaire, d'aucun élément, aussi insignifiant soit-il, susceptible d'entraîner la rupture. Je ne voudrais pas paraître un contemplateur du calcul raisonnable. J'admets que l'absence d'échecs par rupture dans les éléments principaux est une conséquence de calculs suffisants, mais je désire seulement mettre en garde contre le raffinement ou l'arbitraire dans ces calculs, surtout lorsqu'il est combiné avec le dédain du calcul des détails : assemblages, goussets, nœuds, appuis, articulations, contreventements et tous dispositifs destinés à éviter les déformations et l'instabilité (raidisseurs, étrésillons, résistance au flambement, au voilement, à la torsion, etc.). Ce dédain ne provient d'ailleurs souvent que de l'impuissance des méthodes classiques pour calculer certains détails. On dispose actuellement de méthodes expérimentales en nombre suffisant pour les étudier; la plus sûre sera généralement l'essai de rupture à vraie grandeur ou sur un modèle de dimension suffisante. On n'hésitera pas éventuellement à appliquer à ces éléments délicats un coefficient de sécurité élevé; il n'y a pas de vrai mérite à agir autrement.

L'évocation de l'expérience attire l'attention sur la nécessité de tenir le calcul étroitement approprié aux réalités. Sous ce rapport on peut désigner comme arbitraire une prescription belge, que l'on espère provisoire, de considérer l'action simultanée et confondue en tout point d'un tablier de pont, d'un train d'épreuve routier et de la surcharge de foule. Cette superposition doit tenir lieu d'un train d'épreuve renforcé, mais elle a les grands inconvénients de correspondre à une absurdité et non à une réalité, de donner au calcul un caractère conventionnel plutôt que réel et de rendre impossible toute notion de probabilité concernant la sollicitation. De plus, et c'est plus grave, elle engendre une non uniformité de sécurité, car si la superposition de la charge de foule aux charges concentrées du train d'épreuve routier exerce un effet sensible sur la sollicitation des maîtresses-poutres de grande portée, elle est par contre sans conséquences appréciables sur la mise en charge des éléments de petite portée du tablier, qui ne seront donc pas, par cette manière d'opérer, renforcés pour résister aux surcharges concentrées majorées.

L'exécution est un point tout à fait aléatoire au point de vue de la sécurité et que l'on ne voit guère le moyen de traduire en probabilités. L'exécution d'un ouvrage important, conçu et projeté éventuellement par un seul homme entièrement qualifié, requiert l'intervention d'une multitude de gens. De telle sorte que la sécurité dépend de l'état moral, social et économique. Disons plus généralement encore qu'elle dépend des circonstances du lieu. Je trouve très instructif de proposer tous les ans à mes étudiants la comparaison du wharf de Kotonou construit en 1892 à la côte atlantique du Dahomey, comme un ouvrage colonial assez ordinaire, et du wharf de Lomé, construit en 1904 à la côte atlantique du Togo, qui a été détruit en 1911 par une tempête. Ce dernier ouvrage, du type cantilever, était selon toute apparence d'une conception beaucoup plus scientifique que l'autre, sans doute bien calculé et nanti d'un coefficient de sécurité certain; malheureusement il n'a guère duré tandis que l'autre existe toujours, en raison d'une meilleure adaptation à sa situation.

Encore s'agit-il là de circonstances naturelles. Mais des conditions entièrement arbitraires peuvent mettre en danger la sécurité. Je songe aux adjudications publiques et à la règle du choix du plus bas soumissionnaire. Lorsque, et cela arrive, il n'y a pas de garantie de compétence ou de conscience professionnelle ou même simplement de capacité financière, la sécurité d'un ouvrage conçu dans toutes les règles de l'art et avec un coefficient de sécurité normal, peut être entièrement compromise, sans possibilité de prévision.

En ce qui concerne l'exploitation et l'entretien, l'incidence sur la sécurité réside dans l'observation du programme mis à la base du projet, c'est-à-dire dans le fait que l'ouvrage est utilisé d'une manière normale ou abusive et entretenu, conservé selon les règles de l'art ou abandonné à toutes les influences destructrices. Ces questions sont malheureusement très réelles. Je citerai le cas d'une passerelle provisoire pour piétons construite pendant la guerre dans cette province et qui fut utilisée pour de petits véhicules. L'ouvrage tint, bien qu'il fût privé de tout entretien, mais on conçoit qu'il aurait pu s'y engager un véhicule assez lourd pour qu'il ne tint plus. Des panneaux et des bornes, aux deux extrémités de la passerelle, indiquaient naturellement sa destination et interdisaient le passage de tout véhicule sauf les brouettes et les bicyclettes.

*
**

Tous ces éléments complexes, dont certains peuvent paraître triviaux, font partie de la notion de sécurité. N'ai-je dès lors pas raison de la qualifier de véritable synthèse de toutes les activités du constructeur. C'est à ce point que je ne crois pas qu'il soit possible d'en faire comprendre tous les aspects au jeune ingénieur pendant ses études et que je pense que, au point de vue de la sécurité, il doit rester en tutelle pendant quelques années au début de sa carrière, jusqu'à ce qu'il ait acquis une expérience suffisante.

En raison de toutes ces complications fondamentales et inévitables, je ne suis pas enclin à attacher trop d'importance à la notion d'unité de conception des facteurs de sécurité. Cela me paraît relever d'un esprit systématique et théorique qui a certes de la valeur en soi, mais qui n'a que peu de rapports efficaces avec l'ensemble de la question. Je souhaiterais plutôt que la primauté de l'expérience soit avant tout reconnue en matière de sécurité et que les prescriptions soient avant tout adéquates le plus

possible aux réalités, dussent-elles pour cela différer les unes des autres. Et toutes les meilleures prescriptions du monde ne seront utiles aux constructeurs que s'ils sont efficacement garantis contre les défauts systématiques de matière et d'exécution et contre les usages abusifs de l'ouvrage. C'est pourquoi des prescriptions universelles peuvent présenter quelques difficultés, car elles ne trouveront pas en tous pays les mêmes conditions d'application.

2. Sollicitations dynamiques des constructions

Je n'ajouterai guère à mon rapport général. Les remarquables rapports particuliers, notamment suédois, constituent de méritoires contributions à la question au sens des vœux du Congrès de Paris mais ne permettent pas de formuler de nouvelles conclusions; elles confirment les principales lignes des vœux du Congrès de Paris, que je me permets de rappeler à l'attention du Congrès.

Résumé

Par une extension de l'analyse de la notion de sécurité, exposée dans la *Publication Préliminaire*, il est établi que la sécurité dépend sans exception possible de toutes les opérations et interventions humaines depuis la conception d'un ouvrage jusqu'à la fin éventuelle de son existence. La notion de sécurité constitue donc une véritable synthèse de toutes les activités du constructeur. Il est essentiel pour la sécurité effective d'en avoir une opinion aussi universelle; la limitation de la notion de sécurité à certains de ses éléments seulement peut être dangereuse.

Zusammenfassung

Durch eine Erweiterung des Sicherheitsbegriffs, wie sie im *Vorbereicht* dargestellt wurde, wird festgestellt, dass die Sicherheit ausnahmslos von allen den menschlichen Handlungen und Eingriffen, die seit der Zeit des Entwurfs eines Bauwerks bis zum möglichen Ende seines Bestehens vorkommen, abhängt. Der Sicherheitsbegriff stellt daher eine wirkliche Zusammenfassung der gesamten Tätigkeit des Konstrukteurs dar. Es ist notwendig, über die wirkliche Sicherheit eine sehr umfassende Ansicht zu haben; die Begrenzung dieses Begriffes auf nur einige wenige seiner Elemente kann gefährlich sein.

Summary

By an extension of the analysis of the safety notion, exposed in the *Preliminary Publication*, it is established that the safety depends without any exception on all human operations and interventions from the design of a structure to the possible end of its existence. The safety notion constitutes an actual synthesis of all activities of the builder. It is essential for the effective safety to consider the problem in this universal point of view; limiting the safety notion to some of its elements only may be dangerous.