

APPLICATION DES STATISTIQUES DANS LES TECHNIQUES DE LA CONSTRUCTION

R. D'HAVE

*Bureau de Contrôle
pour la Sécurité de la Construction en Belgique, SECO*

1. Introduction.

La conception et l'exécution d'une structure entraînent des décisions qui dans l'optique actuelle des constructeurs se prennent en faisant largement appel aux notions de probabilité et de statistique.

Il faut tout d'abord connaître les sollicitations auxquelles la structure sera soumise, nombre d'entre elles sont aléatoires.

Ensuite il faut choisir les matières constitutives de la structure dont les propriétés ne sont connues que statistiquement.

Puis on doit calculer la structure et là aussi qu'il s'agisse de béton armé, d'acier ou d'autres matériaux, les méthodes de calcul actuelles sont basées sur l'interprétation statistique d'un grand nombre d'expériences.

Sur chantier il faut réceptionner les matériaux, c'est-à-dire vérifier si leurs caractéristiques répondent bien à celles considérées lors de la conception, de plus en plus couramment on utilise à cet effet l'étude statistique des résultats d'essais.

Enfin un ouvrage doit répondre à diverses exigences de confort souhaitées par ses occupants, et c'est statistiquement que l'on détermine les niveaux à atteindre.

2. Sollicitations des ouvrages.

D'une manière générale les sollicitations des ouvrages comportent :

- les charges permanentes, y compris le poids propre de l'élément considéré,
- les surcharges provenant de l'utilisation de l'ouvrage,

- les charges climatiques : action du vent, de la neige, des variations de température, du gel, de l'ensoleillement,
- diverses autres actions telles que retrait, fluage, vibrations,
- éventuellement les effets sismiques, et d'autres phénomènes tels que marées, crues des rivières, variations de la nappe aquifère, érosion, avalanches, tassements miniers.

Ce vaste domaine est probablement celui où les données statistiques font le plus défaut et cependant l'influence que peut avoir une meilleure connaissance des sollicitations sur l'économie finale et la sécurité d'un ouvrage est loin d'être négligeable. Les quelques exemples qui suivent en donneront une idée.

Charges permanentes.

La principale cause de variation réside dans la valeur du poids spécifique aussi bien des matériaux composant la structure que du contenu. Le fait par exemple que le poids spécifique du béton, plus ou moins armé, peut varier de 2,2 à 2,5 représente déjà une marge de plus de 10 %.

D'autre part, les dimensions des éléments de structure ne sont réalisées que dans le cadre d'un système de tolérances, ce qui introduit à nouveau une variation possible de plusieurs pour cent.

Surcharges.

Les surcharges sont en général définies dans les normes sans toutefois qu'il y ait eu d'étude statistique poussée de ce qui peut effectivement exister d'après la destination de la construction. Une telle étude est en cours notamment au Building Research Station en Grande-Bretagne.

Les charges climatiques.

La durée moyenne de vie d'une construction varie suivant sa destination :

- de 30 à 50 ans dans les cas des habitations et immeubles de bureaux,
- parfois plus dans les cas particuliers d'ouvrages peu accessibles ou très coûteux tels que ponts ou murs de quai.

Il faut donc considérer qu'une construction sera presque certainement soumise à tel phénomène naturel ayant la probabilité de se produire au moins une fois tous les trente ans.

Bien entendu, il faut distinguer les parties de construction en fonction de l'importance du dommage qu'entraînerait leur destruction complète ou partielle : on peut, par exemple, tolérer qu'un vent exceptionnellement violent

entraîne des bris de vitres, ou que telle pluie exceptionnelle sature momentanément un égout. Par contre, la stabilité d'ensemble et des parties essentielles doit être assurée dans tous les cas.

On est ainsi amené à définir :

- *les facteurs climatiques extrêmes normaux*, pour lesquels les exigences normales de toutes les parties de la construction doivent rester satisfaites. En général on considère ici une valeur du facteur climatique qui n'est atteinte ou dépassée qu'une fois par an,
- *les facteurs climatiques extrêmes exceptionnels*, pour lesquels il faut assurer la stabilité d'ensemble et la bonne tenue des parties essentielles. On prend ici en considération la valeur du facteur climatique qui peut être atteinte ou dépassée une fois durant la vie de l'ouvrage.

Qu'il s'agisse de la neige, du vent, de la pluie, de la température, de l'ensoleillement ou de l'hygrométrie de l'air, un ensemble de données résultant d'études statistiques menées avec la collaboration des Instituts Météorologiques devraient être rassemblées à l'échelle internationale.

Effets des séismes.

Il s'agit ici d'un problème qui heureusement en Belgique n'a qu'une importance réduite.

Le coût des mesures de protection antisismiques s'élève rapidement avec le niveau de sollicitation envisagé dans les calculs. Ce niveau se choisit, par l'application des règles d'un code de construction antisismique, sur des bases de nature essentiellement probabiliste et statistique. La possibilité d'apparition d'intensités plus élevées que celles considérées, pour faible qu'elle soit, n'est pas nulle; la protection ainsi obtenue est qualifiée de nominale.

Dans certains cas aucune défaillance ne peut être tolérée, il s'agit d'ouvrages pour lesquels un dommage même mineur peut entraîner des conséquences incalculables. Il en est ainsi des réacteurs nucléaires pour lesquels une fuite incontrôlée de produits radio-actifs peut entraîner une menace biologique grave pour toute une population. Pour de tels ouvrages on réalise ce que l'on appelle une protection intrinsèque.

3. Calcul des ouvrages.

Beaucoup d'accidents graves de construction résultent du cumul d'une série d'erreurs, d'omissions, de mauvaises interprétations qui considérées individuellement n'auraient pas eu les mêmes conséquences.

De telles fautes peuvent s'éliminer en améliorant la formation des édificateurs, en incitant ceux-ci à se contrôler et éventuellement à recourir à un contrôle extérieur. C'est ce dernier rôle que remplit un organisme comme SECO, sa mission étant d'agir sur les divers facteurs perturbateurs des risques de construction de façon à les maintenir dans des limites raisonnables, pratiquement et économiquement réalisables.

Dans mon exposé ce n'est cependant pas cet aspect du problème que je voudrais aborder mais bien celui des principes généraux de sécurité des ouvrages du bâtiment et du génie civil.

Résumant une étude en cours au Comité technique 98 de l'Organisation internationale de Normalisation ISO, je dirai qu'il s'agit de définir une méthode de calcul du comportement et de la résistance des structures dans leur ensemble et de leurs éléments constitutifs, soumis à des sollicitations connues ou prévisibles, en vue de réaliser et de maintenir un degré de sécurité approprié.

3.1. Méthodes de calcul.

D'une manière générale on peut distinguer les types suivants de méthodes de calcul :

1. *Suivant le mode d'introduction des coefficients relatifs à la sécurité.*
 - a) La méthode dite des *contraintes admissibles* où la sécurité est assurée en comparant les contraintes maximales sous charges qui se produisent dans un élément de structure, calculées en régime élastique, à des fractions de la limite élastique ou de la résistance des matériaux utilisés. Les coefficients par lesquels ces caractéristiques de la matière sont divisées sont appelés *coefficients de sécurité*. Cette méthode dite « classique » était jusqu'il y a peu de temps à la base de la plupart des normes de conception des ouvrages;
 - b) La méthode dite *d'états-limites*, dans laquelle les sollicitations extérieures (ou les sollicitations intérieures qui en résultent telles que moments fléchissants, efforts tranchants ou moments de torsion) sont comparés à la résistance correspondante de la structure, tandis que les effets des sollicitations de service sont comparés à des valeurs prescrites.

On distingue ainsi des *états-limites ultimes* qui correspondent à la valeur maximale de la capacité portante compte tenu des phénomènes de fatigue et des *états-limites d'utilisation* qui dépendent de l'utilisation normale (déformations limitées, fissuration réduite, absence de vibrations excessives) et de la durabilité.

2. *Suivant la conception même des conditions de sécurité.*

- a) *Les méthodes déterministes* de calcul, dans lesquelles les paramètres de base sont considérés comme non aléatoires.
- b) *Les méthodes probabilistes* de calcul, dans lesquelles les paramètres de base sont considérés comme aléatoires.
- c) *Les méthodes mixtes*, découlant d'une combinaison des méthodes précédentes et que l'on peut définir comme méthodes *semi-probabilistes d'états-limites*.

Afin de préciser les idées je développerai à présent quelque peu l'application de ces méthodes nouvelles de conception des structures au calcul des ouvrages en béton armé.

3.2. Calcul des ouvrages en béton armé.

3.2.1. Méthodes probabilistes.

Un exemple typique est fourni par la méthode de calcul du Professeur Raymond Baus de l'Université de Liège.

Elle est basée sur le fait que la nature complexe du béton armé et le caractère dispersé des résistances de ses constituants confèrent à la sollicitation ultime qu'un élément de construction peut supporter un caractère aléatoire. La détermination de la sollicitation maximum admissible en service se fait alors en considérant la sécurité sous forme d'une *probabilité de ruine* et en limitant la sollicitation admissible à une valeur telle que cette probabilité de ruine soit très faible.

L'analyse statistique d'environ 1500 essais sur poutres en béton armé a permis au Professeur Baus d'établir une série d'abaques destinés à vérifier ou à calculer des poutres de différents types soumises à flexion.

La figure 1 concerne le cas d'une poutre à section rectangulaire, simplement armée, soumise à flexion simple; elle montre comment se distribuent deux variables pairées

$$x = \omega \cdot \sigma_e \quad \text{et} \quad y = M_0/bb^2$$

en cas de rupture par insuffisance de l'acier.

- ω : proportion d'armature longitudinale de traction par rapport à la section de la pièce
 σ_e : limite élastique de l'acier (réelle s'il s'agit d'un acier à palier, sinon conventionnelle à 0,2 %)
- M_0 : moment fléchissant de rupture
 b : largeur de la pièce
 h : hauteur de la pièce
 M_0/bh^2 : moment unitaire de rupture.

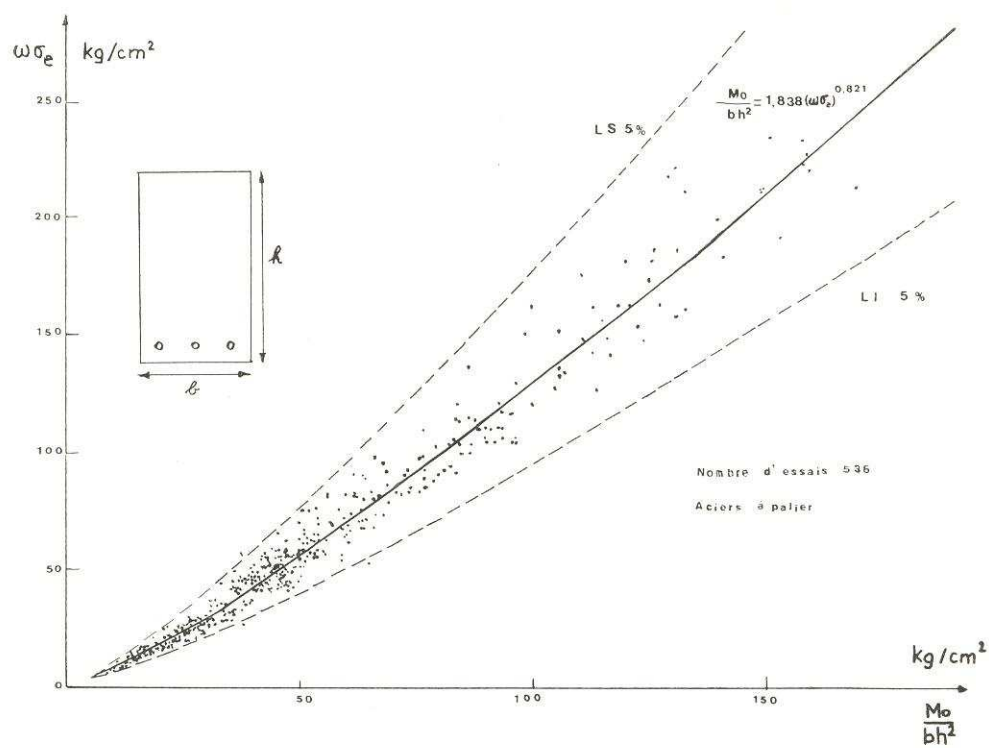


Fig. 1. — Béton armé, rupture par insuffisance de l'acier.

L'expression générale du moment unitaire de rupture est de la forme

$$M_0/bh^2 = f(\omega \cdot \sigma_e)$$

L'étude de la corrélation statistique des résultats d'essai conduit à l'expression suivante :

$$M_0/bh^2 = 1,838 (\omega \cdot \sigma_c)^{0,821}$$

Cette expression est représentée à la figure 1 de même que les courbes limitant les intervalles de confiance au seuil de probabilité de 5 %.

La figure 2 concerne le cas de rupture par insuffisance du béton, les deux variables pairées étant

$$x = \sigma'_{cyl} \quad \text{et} \quad y = M_0/bh^2$$

avec σ'_{cyl} : résistance à la compression du béton mesurée sur cylindre de 15 cm de diamètre et de 30 cm de hauteur.

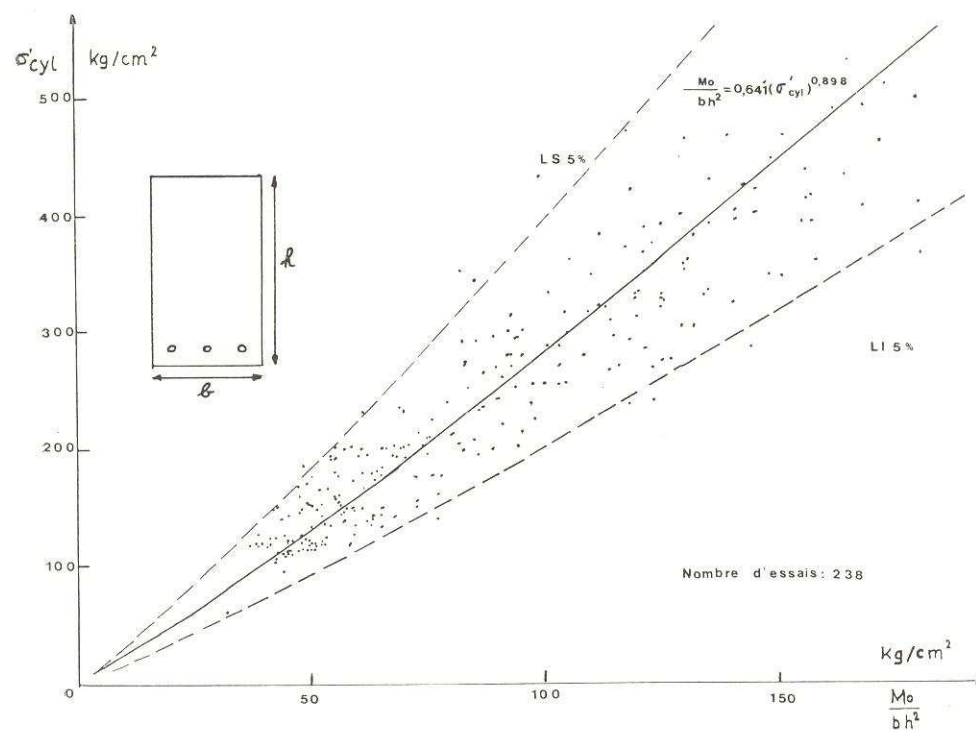


Fig. 2. — Béton armé, rupture par insuffisance du béton.

L'étude par la corrélation statistique des résultats d'essais conduit cette fois à la relation

$$M_0/bh^2 = 0,641 (\sigma'_{cyl})^{0,898}$$

Cette expression est représentée à la figure 2 ainsi que les courbes limitant les intervalles de confiance au seuil de probabilité de 5 %.

La combinaison de ces deux figures fournit l'abaque 1 repris à la figure 3 qui permet de déterminer aisément le moment de rupture le plus probable d'une poutre dont on connaît les caractéristiques de l'acier $\omega \cdot \sigma_e$ et du béton σ'_{cyl} . A chacune de ces valeurs correspond sur l'abaque une valeur de M_0/bh^2 , la plus petite des deux donne le moment de rupture le plus probable et l'on sait immédiatement s'il s'agit de rupture par insuffisance d'acier ou de béton.

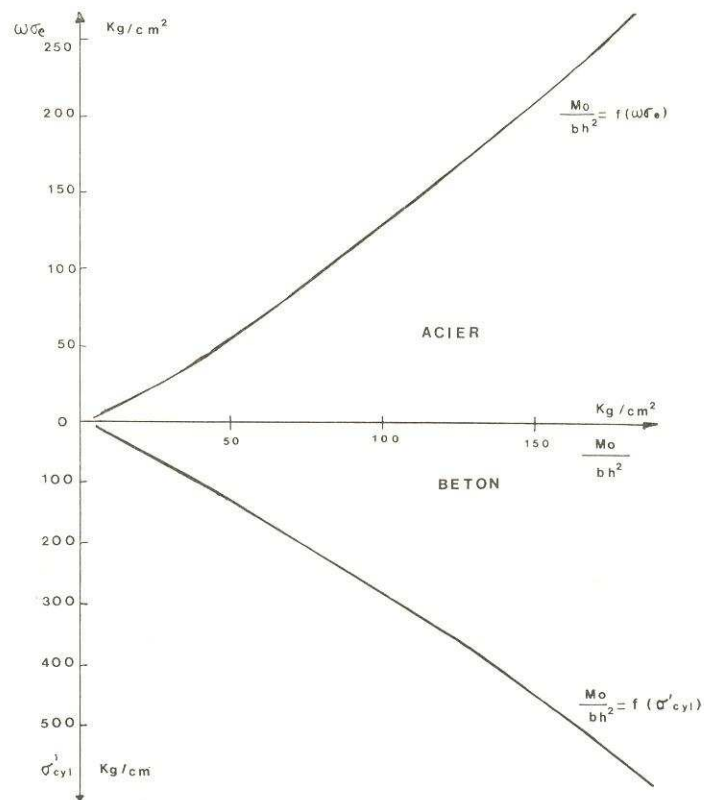


Fig. 3. — Béton armé, abaque de calcul.

On peut aussi tracer des courbes d'égale probabilité de rupture et l'on obtient alors l'abaque 2 repris à la figure 4.

En général, on impose que le risque de ruine présente une probabilité inférieure à 10^{-6} .

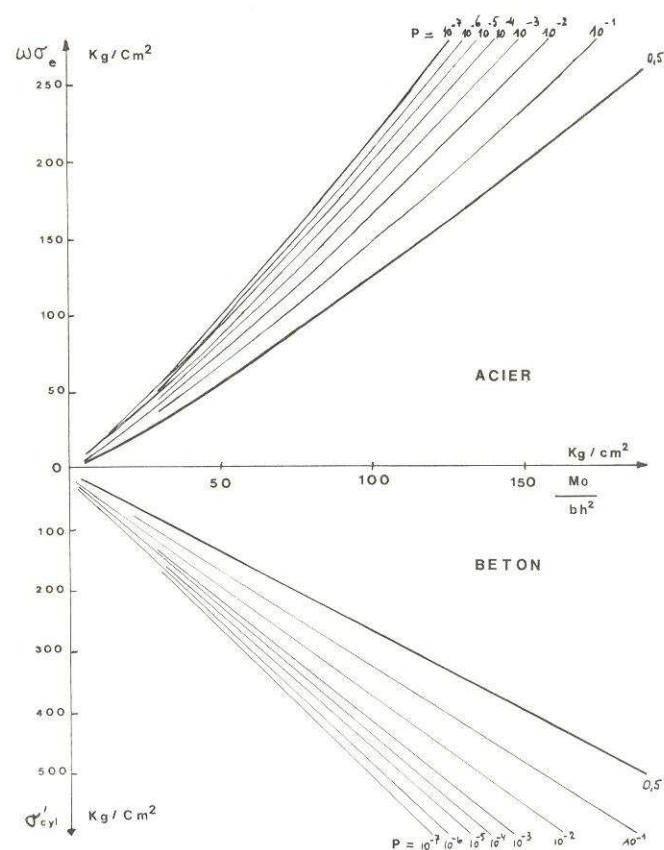


Fig. 4. — Béton armé, probabilité de ruine.

3.2.2. Méthode mixte.

Etant donné qu'une analyse probabiliste complète de la sécurité exige la connaissance des lois de distribution des charges agissant sur la structure, également de la variabilité des propriétés mécaniques des matériaux utilisés ainsi que des variations des dimensions géométriques de la structure, données qui actuellement ne sont pas toutes disponibles, il est apparu nécessaire de simplifier le problème.

C'est ce qui a été fait par le Comité Européen du Béton et la Fédération Internationale de la Précontrainte.

Le principe de la méthode élaborée par ces associations consiste

1. à prendre en compte des *valeurs caractéristiques* des résistances mécaniques des matériaux et des sollicitations extérieures. Chaque valeur caractéristique est déterminée en limitant la probabilité que les valeurs effectives en diffèrent;
2. à couvrir les autres facteurs d'incertitude en transformant ces valeurs caractéristiques en *valeurs de calcul* en les multipliant par certains coefficients;
3. à vérifier que les sollicitations de calcul sont au plus égales à celles qui peuvent être supportées par la structure dans l'état limite considéré.

Les *résistances caractéristiques* des matériaux σ_k sont déterminées sur la base d'une loi normale de distribution et en fixant à 5 % la probabilité qu'elles ne soient pas atteintes.

On a dès lors

$$\sigma_k = \sigma_m - 1,64 s = \sigma_m (1 - 1,64 \delta)$$

σ_m : moyenne arithmétique des résultats d'essais

s : écart-type

δ : coefficient de dispersion.

Les *valeurs caractéristiques des sollicitations extérieures* S_{ek} sont celles qui présentent une probabilité, acceptée à priori, de ne pas être dépassées pendant la vie prévue de la construction

Elles sont données par la relation

$$S_{ek} = S_{em} (1 - k \cdot \delta), \text{ dans laquelle}$$

S_{em} : désigne la valeur de la charge extérieure la plus défavorable ayant une probabilité 0,5 d'être dépassée une seule fois pendant la vie prévue de la construction

δ : coefficient de dispersion de la distribution des charges extérieures maximales

k : coefficient dépendant de la probabilité d'avoir des charges de valeur plus élevée que S_{ek} .

Les données concernant les valeurs caractéristiques des sollicitations sont encore fragmentaires; à titre indicatif, je citerai les valeurs des coefficients de dispersion observés :

- pour les charges permanentes : de 0 à 0,15
- pour les charges variables : de 0,10 à 0,20.

Les résistances de calcul sont définies par la relation

$$\sigma^* = \sigma_k / \gamma_m$$

Le coefficient de minoration γ_m tient compte des imperfections de chantier.

Pour l'acier, le C.E.B. recommande d'adopter pour le coefficient de minoration γ_m la valeur 1,15. Dès lors pour l'acier doux A 37, dont la limite élastique garantie est de 2400 kg/cm², la résistance de calcul vaut

$$\sigma^* = 2400 / 1,15 = 2090 \text{ kg/cm}^2$$

Pour le béton, le coefficient doit être sensiblement plus grand, car les circonstances pouvant affecter sa résistance sont plus nombreuses; le C.E.B. préconise l'adoption d'un coefficient de minoration γ_m de 1,5, aussi bien en compression qu'en traction.

Dès lors, si la résistance moyenne à la compression mesurée sur cubes d'un béton est de 400 kg/cm² et le coefficient de dispersion de 0,15, la résistance de calcul au seuil de probabilité de 5 % vaut

$$\sigma_b^* = \frac{400 (1 - 1,64 \times 0,15)}{1,5} = 166 \text{ kg/cm}^2$$

Les sollicitations de calcul sont déterminées au moyen de la relation

$$S^* = \gamma_s \times S_k$$

Le coefficient de majoration γ_s tient compte entre autres de la possibilité d'intervention de sollicitations extérieures plus défavorables que les sollicitations caractéristiques, de l'influence d'hypothèses de calcul simplificatrices, de l'inexactitude géométrique des sections et de la structure, de la probabilité réduite que les différentes sollicitations extérieures atteignent simultanément leur valeur caractéristique.

Un coefficient de 1,4 représente une valeur courante du coefficient de majoration γ_s des charges caractéristiques.

Dans le cas particulier de la poutre à section rectangulaire, simplement armée, soumise à flexion simple, la condition que la sollicitation de calcul soit inférieure à la résistance de calcul se traduit alors par l'expression

$$\gamma_s \frac{M}{bh^2} \leq \omega \sigma_a^* \left(1 - \frac{\omega}{2} \frac{\sigma_a^*}{\sigma_b^*} \right)$$

4. Appréciation de la qualité des matériaux.

L'on se trouve ici dans un domaine bien connu, je voudrais cependant quelque peu m'étendre sur l'appréciation de la qualité de deux constituants essentiels des structures : le béton et l'acier.

4.1. Bétons.

4.1.1. Généralités.

Nous avons vu que la qualité du béton durci est l'un des éléments déterminants dans l'estimation du degré de sécurité d'une structure en béton armé.

Le contrôle de cette qualité porte surtout sur les caractéristiques mécaniques du béton, notamment sa résistance à la compression; celle-ci est mesurée par l'écrasement d'éprouvettes cubiques ou cylindriques; ces éprouvettes sont moulées, conservées et écrasées dans des conditions normalisées. On dispose ainsi pour chaque ouvrage d'un certain nombre de résultats (parfois en petit nombre) qu'il faut interpréter.

L'utilisation dans ce but des méthodes statistiques a déjà fait l'objet de nombreuses études parmi lesquelles je citerai celles du Prof. Rüsch de Munich (Statistische Analyse der Betonfestigkeit) et celles du Prof. Lambotte de l'Université de Gand (Beoordeling van betondruksterkte door statistische interpretatie van drukproeven).

Dans la suite de l'exposé c'est surtout de notre expérience dans le domaine du béton préparé qu'il sera question et des tendances actuelles, notamment en matière de normalisation.

4.1.2. Béton préparé en centrale.

4.1.2.1. Définition et historique.

Par béton préparé (ready mixed concrete) il faut entendre le béton fabriqué dans des installations fixes appelées centrales à béton, et livré sur chantier par camions malaxeurs, avant la prise du ciment.

Cette industrie, dont l'origine remonte à environ 50 ans, n'a vraiment pris son essor que vers 1930 aux Etats-Unis et dans les pays scandinaves; en Belgique, la première centrale à béton a été mise en activité en 1948 dans la région anversoise, mais ce n'est qu'à partir de 1959 que le développement s'est produit à un rythme accéléré.

A l'heure actuelle plus de 80 centrales sont installées en Belgique, produisant en tout près de 4 millions de mètres cubes de béton par an et consommant 27 % de la totalité du ciment utilisé dans le pays; elles groupent une flotte de 700 camions malaxeurs.

C'est en 1961 que le bureau SECO a été sollicité par un groupe de centrales à béton pour organiser le contrôle de la production.

Dans la suite ce contrôle s'est étendu aux centrales faisant partie de l'Association Professionnelle du Béton Préparé et, depuis le début de 1969, il donne lieu à l'octroi de la marque de conformité aux normes BENOR.

4.1.2.2. Principes du contrôle.

Le contrôle est basé :

- a) sur l'*auto-contrôle de la centrale* comportant notamment des écrasements de cubes de béton durci, effectués dans son propre laboratoire
- b) sur les *visites périodiques* faites par l'organisme de contrôle et les *essais complémentaires* effectués par celui-ci en laboratoires extérieurs, en vue de recouper par sondage les résultats de la centrale.

Le *critère principal d'appréciation* de la qualité est la *résistance* à la compression mesurée sur cubes écrasés à 28 jours d'âge. En vue de constituer des populations relativement homogènes, les bétons sont classés par composition et par catégorie de consistance, l'étendue de chaque catégorie étant suffisamment faible pour limiter la dispersion; à chaque type de béton correspond une résistance à atteindre.

4.1.2.3. Interprétation des résultats par un système de cotation.

Lorsqu'il s'est agi d'interpréter les résultats d'essais, nous avons imaginé un système assez empirique mais très pratique de cotation en nous inspirant de ce qui avait été fait pour les bétons de chantier.

Si R_g est la résistance caractéristique garantie et R le résultat obtenu, celui-ci est apprécié et coté comme suit :

Valeur de R	Appréciation	Cotation
$R > 1,2 R_g$	TRES BON	1
$1,05 R_g < R \leq 1,2 R_g$	BON	2
$0,97 R_g < R \leq 1,05 R_g$	SATISFAISANT	3
$R \leq 0,97 R_g$	FAIBLE	4

La cotation moyenne caractérise la production d'une centrale pour la période relative aux résultats considérés.

Ce système a l'avantage de permettre l'appréciation globale des résultats d'une centrale même si le nombre de résultats est trop faible pour permettre une analyse statistique valable; en effet, vu la grande diversité des types de béton, il faut parfois pour certains de ceux-ci attendre plusieurs mois avant de disposer, dans une centrale donnée, d'un nombre suffisant de résultats.

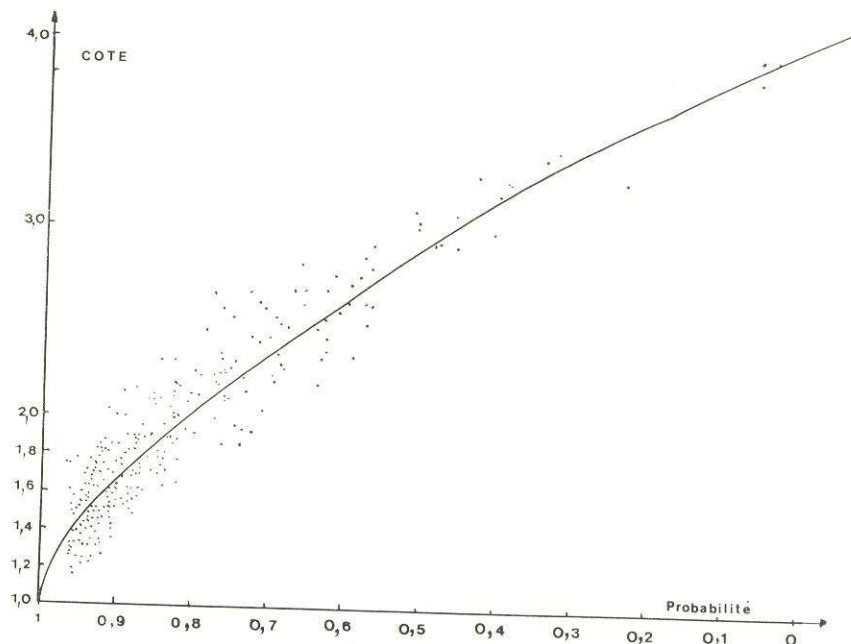


Fig. 5. — Béton préparé, relation entre cotation et probabilité.

La figure 5 définit la relation qui existe entre la cotation et la probabilité d'obtention de la résistance caractéristique garantie. On voit que la cote 1,5 correspond à une probabilité de 95 %.

4.1.2.4. *Interprétation par l'analyse statistique.*a) *Caractère de la population.*

Avant d'envisager une interprétation statistique, il y avait lieu de s'assurer qu'une population de résultats d'écrasement d'éprouvettes d'un même type de béton a une distribution voisine d'une distribution type connue.

Pour plusieurs populations d'éprouvettes de béton, nous avons vérifié que la déviation maximum entre les points de la courbe des fréquences cumulées et la droite de Henry la plus probable restait dans les limites permettant de considérer la distribution comme normale.

Divers auteurs, et notamment Rüsch, l'avaient déjà constaté et nous n'avons fait que confirmer cette hypothèse.

b) *Critère statistique.*

Pour pouvoir appliquer l'analyse statistique, il faut que le critère imposé ait une signification probabiliste.

Nous avons donc admis que la résistance à garantir devait l'être avec une probabilité de 0,95, c'est-à-dire qu'il s'agit d'une *résistance caractéristique*

$$\sigma'_{bk} = \sigma'_{bm} - 1,64 s$$

c) *Relation entre écart-type et moyenne.*

Nous avons pu vérifier que, pour le béton, la loi qui relie les écarts-types à la moyenne est linéaire mais que les dispersions sont cependant assez importantes. C'est ainsi que l'intervalle de confiance au seuil de probabilité de 90 % dépasse la moitié de la valeur correspondant à la droite de proportionnalité.

Les trois causes principales de dispersion des résultats sont : les variations entre gâchées, les variations à l'intérieur d'une gâchée et l'imperfection des moyens de contrôle (modes de prélèvement, de confection, de conservation et d'écrasement des cubes).

Viennent ensuite la variation des qualités intrinsèques des composants du béton qui en centrale sont strictement contrôlés.

En d'autres termes, la dispersion caractérise davantage la qualité de la fabrication que la qualité des composants.

Nous croyons donc que chaque centrale se caractérise par un facteur propre de dispersion qui varie relativement peu en fonction des différents types de béton qu'elle fabrique.

d) *Echantillonnage.*

Jusqu'à ces derniers temps, la tendance était de prélever un assez grand nombre d'éprouvettes d'une même gâchée.

Or on peut établir que si l'écart-type d'une gâchée est de 15 kg/cm^2 , valeur courante, celui de n moyennes de 3 éprouvettes est de 45 kg/cm^2 et celui de n moyennes de 2 éprouvettes de $45,4 \text{ kg/cm}^2$, soit seulement 1 % de plus.

On voit donc que, pour un même nombre de prélèvements dans des gâchées différentes, la valeur de l'information est peu influencée si chaque prélèvement ne comporte que deux cubes d'une même gâchée au lieu de trois et qu'il y a intérêt à augmenter plutôt le nombre de prélèvements dans des gâchées différentes pour améliorer l'information.

e) *Cartes de contrôle.*

L'emploi de cartes de contrôle dans les centrales à béton est actuellement en préparation.

Rappelons que lorsque l'écart-type d'une fabrication varie peu il est possible de déterminer des limites entre lesquelles les résultats doivent se situer avec une probabilité déterminée, tant que la fabrication n'est pas dérégulée.

En général on adopte :

- a) les limites inférieures et supérieures de *surveillance* (L_{is} et L_{ss}) qui correspondent à la probabilité 0,95 d'avoir des résultats entre ces limites
- b) les limites inférieures et supérieures de *contrôle* (L_{ic} et L_{sc}) qui correspondent à la probabilité 0,99 d'avoir des résultats entre ces limites.

Lorsque les résultats individuels se situent entre les limites de surveillance tout va bien, si les résultats se situent entre les limites de surveillance et de contrôle il y a tendance au déréglage, hors des limites de contrôle il y a presque sûrement déréglage.

Un exemple de carte de contrôle pour béton est donné à la figure 6.

On y distingue deux parties :

- la partie supérieure relative à la moyenne des 3 cubes d'un même prélèvement
- la partie inférieure relative à l'écart entre valeurs extrêmes d'un prélèvement (range).

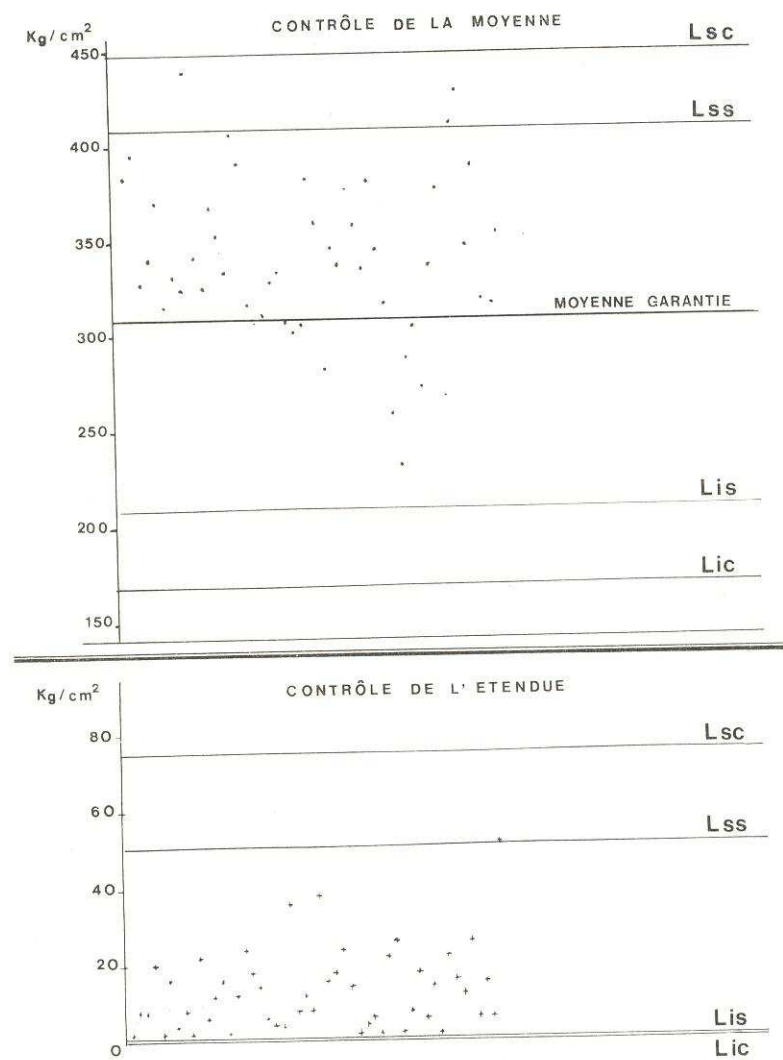


Fig. 6. — Béton préparé, carte de contrôle.

La première partie renseigne sur la dispersion entre gâchées et la seconde sur la dispersion à l'intérieur d'une même gâchée.

En cas de déréglage la recherche des causes se trouve facilitée.

4.2. Aciers.

Les aciers pour béton se prêtent mieux encore que les bétons au contrôle et à la réception par les méthodes statistiques, car en général les coefficients de dispersion sont plus faibles et moins variables que pour les bétons; c'est aussi le genre de produit pour lequel un contrôle statistique est relativement aisé, les populations étant importantes du fait que de petites éprouvettes peuvent être prélevées en grand nombre.

Je commenterai rapidement la norme belge NBN 694.1 relative aux *armatures pour précontrainte* qui pour la première fois en Belgique a introduit les méthodes statistiques de réception.

Les aciers de précontrainte se présentent généralement sous forme de fils étirés d'acier dur, de faible diamètre (2 à 10 mm). L'essai principal consiste à vérifier la résistance à la traction de ces fils, à partir d'un petit nombre d'éprouvettes.

Dans la norme la valeur de la moyenne est considérée comme mesure de la qualité et par conséquent la méthode d'échantillonnage se traduit par un contrôle de la moyenne.

Deux données de départ permettent d'établir le plan opératoire de contrôle :

- a) la première est fournie par le producteur qui à partir d'essais préliminaires effectués en cours de fabrication donne la distribution de la charge de rupture de l'acier. Cette distribution est caractérisée par sa moyenne m_0 et son écart-type σ
- b) la deuxième donnée provient de l'utilisateur qui choisit la valeur garantie V_g . A partir de cette valeur une deuxième distribution est construite de telle façon que la probabilité de rencontrer une charge de rupture inférieure à V_g soit de 2,27 %.

De plus on suppose que l'écart-type reste le même que celui mesuré par le producteur.

La moyenne de cette deuxième distribution vaut dès lors

$$m_1 = V_g + 2\sigma$$

Cette deuxième distribution est une distribution théorique minimale à laquelle la distribution des essais préliminaires doit être supérieure.

Le contrôle de la moyenne revient à vérifier si la moyenne $\bar{X}$ des résultats fournis par prélèvement de n éprouvettes provient soit d'un lot dont la moyenne est égale à m_0 , soit d'un lot ayant comme moyenne m_1 .

Dans le premier cas, la fourniture peut être considérée comme conforme à la qualité annoncée par le fournisseur tandis que dans le second il faut conclure qu'elle s'en écarte nettement.

Pour effectuer ce test, la moyenne $\bar{X}$ est comparée à une valeur moyenne $\bar{X}^*$, dite de référence, valeur déterminée de telle façon que :

- le risque de conclure erronément que la moyenne du lot est m_1 alors qu'elle est en réalité m_0 est de 2,5 %, il s'agit du risque du fournisseur
- et de même que le risque de conclure erronément que la moyenne du lot est m_0 alors qu'elle est en réalité m_1 est également de 2,5 %, il s'agit du risque du client.

Le nombre d'éprouvettes à prélever dépend du rapport $\frac{m_0 - m_1}{\sigma}$, un tableau de la norme le donne immédiatement. Le même tableau permet de déterminer $\bar{X}^*$.

Si, par exemple, on doit réceptionner un lot de fils de 7 mm (section 38,5 mm²) pour lequel :

la résistance garantie : $V_g = 5775$ kg (150 kg/mm²)

la moyenne annoncée par le producteur : $m_0 = 5991$ kg (155,6 kg/mm²)

l'écart-type annoncé par le fournisseur : $\sigma = 62$ kg (1,6 kg/mm²)

on peut calculer : $m_1 = V_g + 2\sigma = 5775 + 2 \times 62 = 5899$ kg (153,2 kg/mm²)

$$\frac{m_0 - m_1}{\sigma} = \frac{5991 - 5899}{62} = 1,48$$

Le norme donne :

$$n = 7$$

et $\bar{X}^* = V_g + 1695 = 5944$ kg (154,38 kg/mm²)

La moyenne $\bar{X}$ de 7 essais doit être supérieure à 5944 kg et la décision est prise sans appel possible.

5. Problèmes de confort.

Traditionnellement, dans les siècles passés, bâtir c'était répondre à un programme défini en appliquant des procédés éprouvés. L'utilisateur n'imaginant pas autre chose se satisfaisait de la répétition de ce qu'il avait toujours vu.

Ce système a subi de nombreuses atteintes et particulièrement lors de l'apparition des équipements de confort. Se sont alors précisées une série de conditions d'habitabilité ayant pour but de satisfaire les exigences psychophysiologiques de l'homme, notamment en matière de chauffage, d'éclairage, naturel ou artificiel, et d'acoustique.

Ici s'introduit la notion de performance, c'est-à-dire d'obtention d'un résultat dont le niveau est imposé. Cette notion permet une grande souplesse de réalisation et laisse la voie ouverte au progrès, puisqu'elle donne la possibilité de satisfaire librement aux exigences par différentes solutions techniques. Elle nécessite cependant la détermination des niveaux de performance à atteindre. C'est un problème vaste et compliqué qui dépend de la réponse de l'occupant d'un bâtiment à diverses stimulations physiques, sa solution implique de nombreuses mesures quantitatives des stimulations et qualitatives des réactions des occupants. L'interprétation de telles observations doit nécessairement se faire par l'analyse statistique.

6. Conclusions.

Le bref aperçu que j'ai pu vous donner des applications actuelles de la statistique dans les techniques de la construction vous aura montré qu'elles y ont introduit un esprit nouveau, plus réaliste, et qui très rapidement a permis de développer des théories originales dans le domaine de la sécurité de même que dans celui du confort, tout en respectant au mieux les règles strictes de l'économie.

J'ai aussi fait ressortir que beaucoup reste à faire, car dans diverses branches les données statistiques manquent encore. Les efforts se poursuivent cependant et c'est ainsi que l'Institut Belge de Normalisation vient, à ma suggestion, de décider de reprendre les travaux de sa Commission d'étude de l'action du vent sur les constructions, le but étant d'adapter les normes actuelles aux idées que j'ai esquissées.

J'ai dû limiter mon exposé à quelques exemples mais, pour terminer, je voudrais souligner ma conviction que l'apport de la statistique dans les nombreuses recherches en cours dans le domaine de la construction contribuera à l'accomplissement rapide de grands progrès dans cet important secteur industriel.