Revue de statistique appliquée

J. Mouy

La sécurité dans les travaux publics. Essai d'une interprétation économique

Revue de statistique appliquée, tome 15, n° 2 (1967), p. 73-82
<http://www.numdam.org/item?id=RSA_1967__15_2_73_0>

LA SÉCURITÉ DANS LES TRAVAUX PUBLICS
ESSAI D'UNE INTERPRÉTATION ÉCONOMIQUE

J. MOUY
Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées

I - LA NOTION DE SECURITE : Caractère insuffisant du nombre qui la représente :

La tâche essentielle du maître d'œuvre est d'apprécier la sécurité d'un ouvrage et de définir les conditions dans lesquelles elle lui paraît assurée.

En fait, comme l'a fait remarquer depuis longtemps M. M. Prot "la notion de sécurité est une de ces notions abstraites, difficiles à saisir dans leur mécanisme intime parce qu'elles résument un cheminement de pensée compliqué, malgré l'apparente simplicité qui résulte de leur caractère familier" [1].

La notion prend corps d'une manière plus concrète dans la définition d'un coefficient de sécurité, rapport entre la résistance réelle du matériau au point considéré et le maximum de la contrainte réelle en ce point, sous l'action du système de charge qui peut lui être appliqué.

Cette définition paraît enregistrer une évidence. Mais, comme le dit M. CL. Gemaehling [2], on ne connaît de manière précise aucun des deux termes de ce quotient. D'autre part, nous verrons qu'elle ne s'applique pas au calcul de tous les coefficients de sécurité utilisés dans la pratique.

Très généralement, on prend en considération, pour les ouvrages en béton armé, le rapport de la résistance moyenne du béton à la contrainte maximale qu'il subit dans l'ouvrage. Le rapport doit être supérieur à une valeur minimale fixée par le cahier des charges. Les récents règlements ont raffiné un peu cette définition en introduisant la dispersion des résistances, et de plus, la valeur minimale autrefois fixée à $1/0,28 = 3,57$ tient maintenant compte de la classe des ciments, du contrôle de fabrication, de l'élancement de la pièce et du type de contrainte.

C'est ainsi que, pour un barrage voûte récent, le constructeur mettait en avant un coefficient de sécurité de 5, rapport de la résistance moyenne du béton (300 bars) à la constante moyenne dans l'ouvrage calculé par la formule du tube (60 bars).

A la réflexion, ce chiffre confortable ne laisse pas d'être un peu surprenant car, quoi de plus connu qu'une charge d'eau, pour laquelle l'hydrostatique donne la solution exacte, et de plus facile à calculer qu'une contrainte dans un tube mince ?

La marge que s'est volontairement fixée le maître d'œuvre paraît vraiment excessive.

A cela vient s'ajouter la comparaison avec le cas des barrages en terre. Pour ceux-ci, on peut définir aussi un coefficient de sécurité, mais celui-ci n'est pas lié au rapport des contraintes, sans intérêt dans un matériau meuble. C'est le rapport entre le moment résistant et le moment moteur qui définissent l'équilibre d'un secteur du barrage le long d'un cylindre de glissement. Si ce rapport est inférieur à 1 pour un secteur particulier, il y a possibilité de glissement en bloc de toute une partie de l'ouvrage, donc ruine certaine et catastrophe très probable. Or, l'expérience montre que ce coefficient est rarement supérieur à 2. Dans les circonstances, il est vrai assez exceptionnelles, de vidange brusque, il peut descendre beaucoup plus bas et l'on se contente généralement d'une limite de 1,3 à 1,4.

La comparaison entre le chiffre de 5 retenu pour un barrage voûte et celui de 1,3 pour un barrage en terre peut surprendre un esprit non averti. Faut-il en conclure qu'un barrage voûte est $5/1,3 = 3,8$ fois plus sûr qu'un barrage en terre ?

En fait, l'exemple est particulièrement frappant parce que la même notion de coefficient de sécurité est appliquée, par une analogie fallacieuse, à des résultats essentiellement différents, affectant des phénomènes dont le mécanisme est structuralement dissemblable. Le chiffre 5 mesure un rapport entre deux contraintes selon la définition donnée plus haut. Il représente la sécurité vis à vis d'une rupture interne. Le chiffre 1,3 donne la valeur de la stabilité de l'ouvrage considéré dans son ensemble.

Ainsi, il y a deux manières de détruire l'organisation d'un objet quelconque : soit l'écraser sous un poids excessif, soit le faire basculer pour détruire son équilibre. Le rapport entre les deux forces nécessaires n'a évidemment aucun intérêt.

Pour une telle comparaison, l'étude statistique des accidents qu'avait tentée quelques auteurs, ne nous est d'aucun secours. En effet, celle-ci n'a de valeur que si les échantillons sont homogènes et comparables. Or, d'un barrage à un autre, les circonstances géologiques et topographiques, la qualité des matériaux, la science du projecteur, la technicité des entreprises, la rigueur du contrôle, l'incidence des ressources financières, le sens de responsabilité du maître de l'œuvre sont autant de variables qui interdisent l'assimilation d'un résultat à un autre, et il en est de même pour tous les ouvrages un peu importants.

Dans quelques cas particulièrement simples, le coefficient de sécurité a un sens précis. Par exemple, les poteaux des lignes électriques sont calculés, sous l'effet du vent règlementaire au coefficient 3 ou 5 selon leur position sur la ligne. Cela peut vouloir dire que si le vent pousse avec une force supérieure à 3 ou 5 fois l'effort du vent règlementaire, le maître de l'œuvre ne peut plus être tenu pour juridiquement responsable des dégâts qui pourraient survenir, et que le risque a paru trop petit pour être assumé.

Mais quand la charge est parfaitement connue comme dans un barrage ou qu'elle n'est pas matériellement susceptible de dépasser une certaine valeur comme pour un pont, on voit mal quelle peut être la signification physique du coefficient de sécurité. Il est rigoureusement impossible que le poids spécifique de l'eau augmente, comme on le produit artificiellement en essayant des maquettes de barrage à la rupture, ou qu'un pont supporte des charges dont la construction est elle-même irréalisable.

II - ANALYSE DU COEFFICIENT DE SECURITE

Certes, le coefficient de sécurité est la mesure de notre ignorance, mais cette ignorance, en décomposant son effet, porte sur trois objets.

Elle porte d'abord sur l'effort global que subit l'ouvrage. Cet effort peut être très variable comme pour les lignes électriques, limité à une valeur finie comme pour un pont, ou très bien connu comme pour un barrage (si l'on tient pour négligeable certains effets parasites comme la poussée des glaces ou l'augmentation de la densité de l'eau par des particules en suspension).

Elle porte ensuite sur l'influence de la diffusion de ces efforts à l'intérieur de la matière. Elle mesure donc notre impuissance à résoudre complètement le problème de résistance des matériaux, celle-ci étant prise dans un sens très général englobant à la fois la résistance des matériaux classiques, mais aussi les phénomènes dus aux vibrations et affectant la structure intime du corps comme la déformation et l'écoulement.

Enfin, elle porte sur les qualités de résistance de la matière, à l'intérieur du corps, lesquelles n'ont aucune raison d'être rigoureusement constantes d'un point à un autre.

La première et la troisième incertitudes sont susceptibles d'une représentation probabiliste mais, fait très important, la structure de cette représentation est différente. Dans le premier cas, la dispersion est dans le temps, tandis que dans le dernier, elle est dans l'espace. Il est donc impossible, pour un ouvrage déterminé, d'assimiler le schéma probabiliste à un tirage dans deux urnes différentes et à la comparaison des résultats comme cela peut être possible pour une suite de pièces à vérifier. Le problème doit être étudié de plus près.

La deuxième incertitude est d'un genre très différent puisqu'elle met en cause notre aptitude, plus ou moins poussée, à représenter le phénomène physique dans son essence par un modèle mathématique, et à résoudre le problème qui en résulte. Nous examinerons successivement ces différentes incertitudes.

A - Effet global :

Dans la plupart des cas, sur un ouvrage déterminé, l'effort global peut être caractérisé par une suite limitée de nombres, variables dans le temps. Il peut être représenté, au i ème intervalle de temps indivisible, par la réalisation d'une variable aléatoire Fi.

On peut connaître (par l'ajustement des lois connues aux chiffres donnés par l'expérience ou par raisonnement) la loi de répartition de la variable aléatoire Fi :

$$P_i(f) = \text{Prob } [F_i \leqslant f] \qquad (1)$$

$P_i(f)$ est fonction de f et aussi, dans le cas le plus général de i, du fait d'une certaine dérive dans le temps (augmentation du trafic pour un pont, vieillissement de la matière, etc.). Elle est définie dans l'intervalle $0.\infty$. Si on connaît une suite de n intervalles de temps consécutifs, on a :

$$\text{Prob (maximum de } F_i \leqslant f) = P_1(f)\ P_2(f)\ \dots\ P_n(f) \qquad (2)$$

S'il n'y a pas de dérive $P_1(f) = P_2(f) \ldots = P_n(f)$

et $$\text{Prob (maximum de } F \leqslant f) = P(f)^n \qquad (3)$$

si les efforts successifs sont indépendants en probabilité, ce qu'il paraît raisonnable de supposer.

C'est plutôt la probabilité de dépassement qui nous intéresse et qui est donnée par :

$$P_n(f) = \text{Prob (maximum de } F_i \geqslant f) = 1 - P_1(f)\, P_2(f) \ldots P_n(f) \qquad (4)$$
$$= 1 - P(f)^n \text{ sans dérive} \qquad (5)$$

ou, en fonction du temps de retour moyen $\bar{T}$

$$P_n(f) = 1 - \left(1 - \frac{1}{\bar{T}}\right)^n \qquad \text{(Réf. 3)}$$

B - Diffusion de l'effort :

Le calcul des contraintes est un problème classique de résistance des matériaux, mais il se heurte rapidement, pour les structures un peu complexes hyperstatiques comme les barrages, à de grosses difficultés.

D'une manière très générale, on peut dire que, une structure étant continue, la déformation en un point quelconque est une fonction de chacun des efforts appliqués qui, en première approximation, est linéaire. Le problème de détermination des déformations, donc des contraintes, s'assimile ainsi à la résolution d'équations linéaires, donc à l'inversion de matrices. C'est d'ailleurs bien ainsi que se présentent les méthodes modernes d'analyse des structures (méthodes d'Argyris et de Livesley) ou le calcul des ouvrages très hyperstatiques [4].

Jusqu'à ces dernières années, l'analyse fine de ces structures se trouvait très rapidement limitée par les moyens de calculs utilisables. Mais l'apparition des ordinateurs a radicalement changé les conditions de travail des ingénieurs préoccupés de connaître, de la façon la plus poussée possible, les incidences des efforts sur une pièce de forme complexe.

Notre connaissance n'est pas parfaite, loin de là, mais au fur et à mesure que les théories se perfectionnent et que les moyens de calcul deviendront plus puissants (si l'on veut bien utiliser les uns et les autres), nous parviendrons à une connaissance de plus en plus parfaite du mécanisme d'épanouissement des efforts à l'intérieur de l'ouvrage. Cette imperfection est essentiellement différente de celle qui limite notre connaissance de phénomènes intrinsèquement aléatoires, comme la force du vent et la qualité spécifique à l'échelle fine d'un matériau.

Toutes choses étant égales par ailleurs, elle s'apparente à l'utilisation de nombres irrationnels comme π dans un calcul : la valeur exacte nous sera toujours inconnue, mais nous pourrons obtenir une valeur approchée avec une précision aussi grande que nous le désirons, à condition d'y mettre les moyens intellectuels et matériels nécessaire.

C - Qualité du matériau :

Aucun matériau de fabrication humaine n'est parfaitement homogène, quelles que soient les précautions prises dans son élaboration.

Quant à la fondation qui fait aussi partie de l'ouvrage en tant qu'organe de transmission et d'épanouissement des efforts, sa qualité est certainement très variable d'un point à un autre.

Notons d'ailleurs que le fait même physique de la rupture exige une hétérogénéité. Si le matériau était idéalement homogène, l'amorce de rupture n'aurait aucune raison de se produire en un point plutôt qu'en un autre, et le corps résisterait indéfiniment, hypothèse évidemment impossible à admettre.

La répartition des résistances par analyse des essais d'éprouvettes a fait l'objet d'études statistiques qui ont porté surtout sur la recherche d'une loi de probabilité représentative de l'hétérogénéité du matériau [2] [5] ; la loi la mieux adaptée semble être la loi de Gumbel (ou de Weibull) qui est la suivante :

Probabilité que, en un point, la résistance à la rupture soit supérieure ou égale à r :

$$\begin{aligned} &\mathrm{Prob}(R \geqslant r) = F(r) \\ &F(r) = \exp\left[-\left(\frac{r-m}{r_0}\right)^{\alpha}\right] \\ &E(r) = m + r_0\,\Gamma\left(1+\frac{1}{\alpha}\right) \\ &V(r) = r_0^2\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1+\frac{1}{\alpha}\right)\right] \end{aligned} \tag{6}$$

Γ = Fonction eulérienne de première espèce.

Pour les terrains naturels, le problème est beaucoup plus difficile du fait qu'à une différence de qualité, selon le point considéré, s'ajoute une différence selon l'orientation de la surface sur laquelle agit la contrainte. Les études en sont encore à définir un critère de qualité convenable, qui tienne compte à la fois de la résistance u intrinsèque du matériau, de l'importance et de l'orientation des accidents de structure, éventuellement aussi de son altération dans le temps, du fait de son vieillissement ou de l'influence de l'eau [6].

III - DEFINITION DU RISQUE

A - Rupture interne :

La sécurité de l'ouvrage est assurée si, en chacun des ces points, et en tous temps, on a l'inégalité :

$$\sigma < \bar{\sigma} \tag{8}$$

σ représente la contrainte (normale ou de cisaillement) résultant des efforts appliqués et $\bar{\sigma}$ la résistance au point considéré [1].

----

(1) Conformément aux notations normalisées des calculs du génie civil, σ désigne ici la contrainte (force par unité de surface) et non un écart-type.

Cette inégalité n'est malheureusement pas utilisable dans la pratique du fait que σ est variable dans l'espace et dans le temps et que $\bar{\sigma}$ est variable dans l'espace. On peut dire aussi éventuellement que $\bar{\sigma}$ varie dans le temps si l'on tient compte d'une certaine évolution du matériau ; mais la loi qui définit celle-ci est déterministe alors que celles qui représentent les variations de $\bar{\sigma}$ dans le temps et de σ dans l'espace sont forcément de nature probabilistique du fait de notre ignorance foncière sur la valeur des efforts et l'homogénéité du matériau.

Décomposons l'ouvrage en un certain nombre V de parties que l'on peut considérer comme homogènes, à la fois pour la contrainte qui y apparaît et pour la qualité du matériau (de fabrication humaine dans la superstructure ou donné par la nature dans l'infrastructure).

Etendue à tout l'ouvrage, l'inégalité devient :

$$[N] < [R] \qquad (9)$$

[N] : vecteur aléatoire dans le temps dont les V coordonnées sont les valeurs des contraintes dans chacune des parties homogènes de l'ouvrage.

[R] : vecteur aléatoire dans l'espace de V composantes, caractérisant les qualités du matériau dans chacune de ces parties. La résistance des matériaux nous a fourni la matrice A telle que :

$$[N] = [A]\,[F] \qquad (10)$$

[F] : vecteur aléatoire dans le temps, dont les coordonnées sont les valeurs des forces appliquées en différents points par l'ouvrage.

[A] : matrice de transition, d'où :

$$[A]\,[F] < [R] \qquad (11)$$

Si l'on considère une suite de n intervalles de temps consécutifs, constituant la vie de l'ouvrage, la probabilité de dépassement de chaque force F est donnée par l'équation 4 ou 5. Celle-ci définit une densité de probabilité p(f) telle que :

$$\int_f^{\infty} p_n(x)\ dx = p_n(f) \qquad (12)$$

Si la qualité du matériau était absolument identique en tous ses points de résistance et si les différentes parties de l'ouvrage étaient indépendantes, le risque de destruction serait la somme des risques en chacun des points et il serait donné par :

$$X = \Sigma_V\ [\text{Prob}\ (\sigma \geqslant \bar{\sigma})]\ ,$$

la sommation étant étendue aux V parties de l'ensemble. En fait, ce calcul pêche sur deux points. D'une part, comme nous l'avons vu, le matériau n'est pas homogène et la contrainte limite $\bar{\sigma}$ varie aléatoirement d'un point à un autre. D'autre part, les probabilités de défaillance dans les différentes parties de l'ouvrage ne sont évidemment pas indépendantes. La probabilité totale est très inférieure à la somme des probabilités par suite du phénomène d'adaptation bien connu des constructeurs. Les parties intactes viennent secourir les parties en péril et l'ensemble reste sauf.

L'analyse précédente ne serait valable que pour un ensemble constitué de blocs homogènes (comme ces pyramides de boîtes de conserves aux étalages des épiciers) dans laquelle la ruine d'un élément entraîne la destruction de l'ouvrage, totale ou partielle, mais en tous cas sa mise hors service du fait de la disparition de son intégrité. Entre ce schéma et celui d'un massif plastique pour lequel une rupture interne, même étendue, est sans importance pour la sécurité de l'ensemble, il peut y avoir tous les intermédiaires. Ainsi, le calcul du risque d'une construction implique les opérations suivantes :

a) Etablissement des lois de probabilités de dépassement des efforts extérieurs appliqués $P_n(f)$ pour la durée de vie estimée de l'ouvrage et de la densité de probabilité correspondante.

b) Calcul de la matrice de transition (A).

c) Calcul des contraintes dans chacune des différentes parties, au nombre V, de l'ouvrage et déduction de leur probabilité d'apparition, en fonction de celles des efforts extérieurs.

d) Etablissement de la loi de probabilité de la résistance des différentes parties de l'ouvrage (infrastructure, superstructure), c'est-à-dire, si l'on suit la loi de Weibull, des coefficients m, r_0 et α pour ces différents ensembles.

e) Evaluation des "coefficients de responsabilité de destruction" λ au nombre de V, qui mesurent l'influence d'une rupture localisée sur la tenue, ou plutôt la faculté d'utilisation de l'ensemble de l'ouvrage. Ces coefficients λ peuvent varier de 0, lorsqu'il s'agit d'un élément accessoire, à 1 pour les pièces essentielles.

Dans un pont métallique triangulé par exemple, les coefficients de responsabilités de destruction de chacune des barres sont égaux à 1, tandis que, dans un massif en terre, deux des éléments internes sont nuls.

f) Le risque de destruction de l'ouvrage est donné par la formule :

$$X = \Sigma_v [\lambda \text{ Prob } (\sigma \geqslant \bar{\sigma})]$$

Le risque X se calcule par la méthode de simulation synthétique, en affectant à $\bar{\sigma}$ une valeur aléatoire dont la fonction de répartition est connue.

Si le nombre V des parties de l'ouvrage est suffisamment grand, la somme X converge vers une valeur bien déterminée.

B - <u>Déséquilibre</u> :

A ce risque de rupture structurelle peut s'ajouter le risque de déséquilibre global qui n'existe pas toujours, mais qui est prépondérant pour certains ouvrages (basculement d'un barrage poids, glissement dans un barrage en terre, renversement pour un appareil de levage, etc.). Il se calcule plus simplement :

$$Y = \Sigma [\text{Prob } (F \leqslant Fr)]$$

Fr étant l'effort limite qui provoque la catastrophe.

Le risque total est la somme $R = X + Y$.

IV - INTERET DE LA NOTION DE RISQUE

Il pourrait sembler à priori que le calcul précédent, dont la complexité est indéniable, n'a pas servi à grand'chose puisqu'il a substitué à une notion peu claire, mais à laquelle chacun est habitué, le coefficient de sécurité, une notion toute nouvelle, le risque, peu chargée d'évaluation intuitive et caractérisée par un nombre très petit, parlant peu à l'esprit.

Au lieu d'un coefficient de sécurité, J. Talobre, promoteur de cette notion dans la construction des barrages, propose pour un certain ouvrage un risque chiffré à 0,000 005 [7], mais ce chiffre ne représente rien de tangible.

Il faut aussi avouer que, tandis qu'un coefficient de sécurité procure une certaine impression de confort, le mot de risque sonne mal et provoque même l'inquiétude. De plus, pourquoi s'arrêter à telle valeur numérique plutôt qu'à une autre ?

En fait, nous débouchons au contraire sur un concept extrêmement connu et fécond puisque le risque est la base de la théorie des assurances et conduit à une foule d'applications dans les domaines du calcul économique et de la prévision des dépenses.

Un ouvrage est destiné à rendre un certain service. Ce service doit être assuré au moindre coût global, ce dernier étant la somme de la dépense de réalisation (y compris les frais d'entretien actualisés) et l'estimation du coût des dommages occasionnés par l'ouvrage s'il vient à se rompre.

Alors que les investissements sont certains et immédiats, les frais d'entretien évalués et étagés dans le temps, les dommages ont un caractère aléatoire.

Pour que l'optimum économique soit atteint, il faut minimiser l'espérance mathématique actualisée du coût global. Soit un ouvrage projeté dont les caractéristiques techniques et économiques sont les suivantes :

- ses dimensions sont définies par un certain nombre de paramètres généraux, dimensions générales, poids par unité de surface pour un pont, épaisseur pour un barrage, contrainte moyenne, etc. qui constituent les coordonnées d'un vecteur E :

- en cas de rupture, il occasionne des dommages qui sont fonction de ses dimensions (et éventuellement du temps) et dont l'évaluation de la dépense est D (E,t).

- le risque de rupture R = X + Y est fonction de E (et éventuellement du temps) et fournit en densité de probabilité du coût des dommages dR(E, t).

- le coût de l'ouvrage est C(E).

- les frais d'entretien par unité de temps sont F(E, t).

Dans ces conditions, le coût global actualisé de l'établissement de l'ouvrage projeté pendant sa durée de vie n, s'écrit :

$$\dot{H}(E) = C(E) + \int_0^n e^{-it} \; F(E,t) \; dt + \int_0^n e^{-it} \; dt \int_0^1 D\,(E,t) \; dR\,(E,t)$$

i est le taux d'intérêt continu de l'argent. Il s'agit maintenant d'optimaliser les dimensions de l'ouvrage, en déterminant les composantes du vecteur E, qui rendent la fonction H(E) minimale.

Cette méthode est la généralisation de celle qui a été proposée et utilisée pour le calcul du dimensionnement des ouvrages de protection contre les crues.

Signalons, à la suite de M. J. Bernier, la difficulté conceptuelle qui s'attache au critère économique retenu.

Le problème revient à minimiser l'espérance mathématique d'une dépense, plus ou moins catastrophique, c'est-à-dire la somme des produits de ces dépenses par leurs probabilités respectives d'intervention.

La notion objective de la probabilité est liée à l'idée d'une possibilité de répétitions des phénomènes en cause. Mais, dans le cas particulier, la durée moyenne entre deux apparitions du phénomène (inverse de la probabilité) excède la plupart du temps la durée de vie de l'ouvrage. D'autre part, il paraît avantureux et même quelque peu immoral de faire intervenir dans un calcul qui s'apparente en celui d'un gain dans un jeu, des dépenses qui correspondraient à la ruine de personnes et même à leur mort.

C'est qu'il s'agit là d'un problème de probabilités subjectives dont certains statisticiens ont montré qu'elles se combinaient d'une façon dont les théorèmes fondamentaux du calcul des probabilités rendent compte [9]. Le critère de décision est basé sur un pari au sens le plus noble du terme, lequel se trouve, plus ou moins conscient, dans toutes les actions humaines d'une certaine envergure.

C'est, effectivement, celui auquel se réfère un maître de l'œuvre lorsqu'il envisage l'éventualité d'une action destructrice et la nécessité d'un renforcement de l'ouvrage.

Le supplément de prix correspondant est-il en rapport avec la possibilité d'un accident ? Chacun juge selon son tempérament, timoré ou avantureux, les disponibilités financières qui lui sont accordées, son intuition, son expérience ou son flair, qui ne sont souvent que le masque de l'ignorance, mais font autorité.

Il paraît souhaitable d'introduire quelque logique dans ce débat de façon à ce que la décision prise soit moins le reflet d'une tendance subjective, mais plus nettement la conséquence d'une étude raisonnée.

Certes, la méthode que nous préconisons se heurte à une foule de difficultés. Elle suppose une analyse statistique rigoureuse, une connaissance approfondié du comportement interne de l'ouvrage, une somme de calculs impressionnante et nous avons vu que pour certains éléments, comme la fondation, la définition de la qualité du matériau était encore très vague.

Mais il paraît possible, dans certains cas particuliers, pour les ouvrages de forme simple, de définir une ligne de conduite. L'exemple du déversoir du barrage de SERRE-PONÇON, où un calcul de ce type a retrouvé l'évaluation plus ou moins intuitive des hydrologues, permet de bien augurer de la méthode.

La plus grosse difficulté proviendrait sans doute de la nécessité absolue de prévoir tous les effets destructeurs qui pourraient s'attaquer à l'ouvrage. Une telle étude exhaustive est fort difficile pour les ouvrages d'une conception nouvelle et l'expérience montre que les accidents importants sont beaucoup moins dus à une faiblesse devant les effets "classiques" qu'à une inadaptation complète à un phénomène inattendu. La nature a souvent plus d'imagination que le projeteur.

Il semble cependant que l'étude en vaille la peine car elle permettrait d'introduire un peu de clarté dans les discussions sans fin auxquelles aboutissent le plus souvent les querelles d'experts.

BIBLIOGRAPHIE

[1] M. PROT - La thèse probabilistique de la sécurité. Annales des Travaux Publics de Belgique, août 1952, page 519.

[2] Cl. GEMAEHLING - L'amélioration de la résistance à la compression des bétons dans les chantiers du Bas Rhin. Rapport n° 2 au 8ème Congrès International des Grands Barrages Edimbourg, mai 1964 (question n° 30).

[3] L.E. BORGMAN - Risk criteria. Journal of the waterways and harbors division (ASCE) août 1963.

[4] J.M. BOISSERIE - Formulations matricielles et équilibre élastique d'un barrage - voûte. Bulletin du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou, n° 4 1963.

[5] M. DAVIN - Etudes statistiques sur la résistance des corps prismatiques soumis à des champs de contrainte uniformes. Annales des Ponts et Chaussées 1956-57.

[6] Groupe de travail du Comité National Français - Les effets physico-chimiques de l'eau dans les appuis de barrage. Rapport n° 17 au 8ème Congrès International des Grands Barrages Edimbourg, mai 1964.

[7] J. TALOBRE - Comment définir la sécurité des grands barrages ? Compte rendus du 8ème Congrès International des Grands Barrages, Edimbourg, mai 1964, page 191.

[8] J. BERNIER - Portée et limites des méthodes de prévision statistique des crues utilisées dans le calcul économique des ouvrages de protection contre les crues. Bulletin du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou, n° 6, de décembre 1963.

[9] J. DREZE - Les probabilités subjectives ont-elles une signification objective ? Economie Appliquée, 1960, page 55 - 70.