

COMMENTAIRES ET DISCUSSIONS
COMMENTS AND DISCUSSIONS

The collapse of smooth metal pipes embedded in concrete
Limiting external pressure for the collapse

L'instabilité
des conduites métalliques lisses noyées dans du béton
Pression extérieure correspondant à la limite d'instabilité

In Nos. 4 (June) and 5 (September-October), 1960, of *La Houille Blanche* Messrs. Troisvallets and Montel discussed the instability of steel pipes embedded in concrete in the following articles:

- « Essais sur l'instabilité des conduites métalliques lisses noyées dans du béton et soumises à une pression extérieure (Tests concerning the collapse of smooth metal pipes embedded in concrete and subjected to external pressure) », by R. TROISVALLETS and R. MONTEL (Nos. 4 and 5);
- « Formule semi-empiriques pour la détermination de la pression extérieure limite d'instabilité des conduites métalliques lisses noyées dans du béton (A semi-empirical formula for determining the limiting external pressure for the collapse of smooth metal pipes embedded in concrete) », by R. MONTEL (No. 5).

Messrs. Troisvallets and Montel are to be commended for their excellent work. The tests show conclusively the adverse effects of out-of-roundness (ovalité) and play (jeu) between concrete and steel.

In Table VI the authors show a comparison between their observed results and the calculated

Dans les numéros 4, de juin, et 5, de septembre-octobre, 1960, de *La Houille Blanche*, MM. Troisvallets et Montel ont traité de l'instabilité des conduites d'acier enrobées, sous les titres suivants :

- « Essais sur l'instabilité des conduites métalliques lisses noyées dans du béton et soumises à une pression extérieure » par R. TROISVALLETS et R. MONTEL (nos 4 et 5);
- « Formule semi-empirique pour la détermination de la pression extérieure limite d'instabilité des conduites métalliques lisses noyées dans du béton », par R. MONTEL (n° 5).

Ces deux études excellentes méritent notre approbation. Les essais montrent d'une façon concluante l'influence défavorable de l'ovalité et du jeu entre le béton et le blindage.

Dans leur tableau VI, les auteurs ont comparé les résultats notés au cours de leurs essais aux valeurs théoriques de la pression d'instabilité calculées à l'aide des formules proposées par divers auteurs. Le tableau VII montre les pourcen-

values of buckling pressure (pression d'instabilité) using formulas proposed by different investigators. In Table VII are shown the percentage deviation from test values for the same calculated of buckling pressure.

In the second paper noted above, Mr. Montel presents a semi-empirical equation based on the test results which he believes to be applicable within the range of conditions tested.

In reference to Table VI the authors have calculated the resistance to buckling without regard to the out-of-roundness (ovalité) of the shell. At the same time they have been careful to include out-of-roundness in their own semi-empirical equation. Had they taken this factor into account in all calculations, the values determined by the methods of Amstutz, Borot, Juillard and Varriot would have been smaller than shown in the table and the comparison would have been quite different. For example, the equation of Borot would be found to agree quite closely with the test results.

Several years ago the writer developed an equation for determining the critical external pressure that would cause collapse of a thin steel tunnel lining embedded in concrete. This development was described in a paper published by the *American Society of Civil Engineers* under the following title:

"Steel linings for pressure shafts in solid rock," *Journal of the Power Division*, No. PO 2, April, 1956, American Society of Civil Engineers.

The equation given in that publication for determining critical pressure has since been simplified to the following form:

$$\frac{T}{R} = \frac{\sigma_y - \sigma_{cr}}{2 E'} + \frac{6 \sigma_{cr}}{\sigma_y - \sigma_{cr}} \left(\frac{y_0}{R} + \frac{\sigma_{cr}}{E'} \right)$$

where:

T = thickness of steel shell;
 R = radius of shell;
 σ_y = yield point of steel;
 σ_{cr} = critical stress in steel;
 E = modulus of elasticity of steel;
 $E' = E/(1 - \nu^2)$ where ν = Poisson's ratio;
 y_0 = algebraic sum of deviation from roundness, air gap between steel and concrete envelope, and strains due to shrinkage or prestress. An initial freedom to distort, taken equal to $(j + u)$ in this instance.

As a matter of personal interest, the writer tested his equation against the test values of Troisvallets and Montel and against the semi-empirical equation of Montel. The results, given

tages d'écart des valeurs d'essais pour les mêmes valeurs calculées de la pression d'instabilité.

Dans la deuxième étude, M. Montel présente une formule semi-empirique tirée des résultats des essais et dont il fait valoir la validité dans les limites des conditions d'essai.

Les résultats classés au tableau VI montrent que les auteurs ont calculé la résistance au flambage sans tenir compte de l'ovalité de la conduite. Au contraire, ils ont eu soin de faire figurer l'ovalité dans leur propre formule semi-empirique. S'ils avaient tenu compte de ce facteur dans tous les calculs, les valeurs déterminées par les méthodes d'Amstutz, Borot, Juillard et Varriot auraient été inférieures à celles indiquées au tableau, et la comparaison avec les résultats des essais aurait été tout autre. Par exemple, l'équation de Borot se serait ainsi trouvée en accord étroit avec les résultats expérimentaux.

Il y a quelques années, l'auteur soussigné a mis au point une formule donnant la pression extérieure limite d'instabilité pour une conduite d'acier mince noyée dans du béton. Cette étude a fait l'objet d'un mémoire publié par l'*American Society of Civil Engineers* sous le titre :

« Steel lining for pressure shafts in solid rock (Blindage métallique pour conduites forcées en rocher compact) ». *Journal of the Power Division*, No. PO 2, April, 1956.

La formule présentée dans ce mémoire a pris par la suite la forme simplifiée suivante :

où :

T = épaisseur du blindage;
 R = rayon du blindage;
 σ_y = limite élastique de l'acier;
 σ_{cr} = contrainte limite de l'acier;
 E = module d'élasticité de l'acier;
 $E' = E/(1 - \nu^2)$ où ν = coefficient de Poisson;
 y_0 = somme algébrique de l'ovalité, du jeu entre acier et béton et des déformations dues au retrait ou à la précontrainte, une liberté initiale de distorsion égale à $(j + u)$ étant adoptée dans ce cas.

Pour son compte personnel, l'auteur a vérifié son équation sur les résultats expérimentaux de MM. Troisvallets et Montel et sur la formule semi-empirique de M. Montel. Les résultats indi-

in the following tabulation, show that the writer's equation compares favorably with test results.

TEST DESIGNATION	CRITICAL PRESSURE (kg/cm ²)		
	Test	Montel	Vaughan
24-II	17.0	17.6	16.3
20-II	12.5	11.6	9.8
16-I	11.0	10.9	12.2
16-II	8.0	8.2	6.5
12-I	5.8	5.9	6.1
16-III	9.0	9.3	10.1
16-IV	8.0	10.0	11.5

Mr. Montel's equation agrees more closely with the given test results since it is based upon them. Additional tests would be desirable to determine whether or not repetition of testing and extension beyond the range of conditions already tested would result in confirmation of the equation as presented or in modification to fit a greater array of data. The writer believes that further testing would result in a greater spread of values. It is not unreasonable to expect fairly wide differences between individual tests and the calculated values even though the method of calculation may accurately taken in account all of the various factors affecting the result. The physical difficulty of measuring the gap (j) between steel and concrete and of the deviation of the tube from true circular form (u) is bound to result in errors, some which may be substantial. In addition, the length of the test section, which in this case was less than the diameter of the tube, introduces further errors due to end effects.

The writer does not understand Mr. Montel's reasons for giving j twice as much weight as u in the semi-empirical equation. It would seem that these two factors would be equal in importance.

E.W. VAUGHAN.

We submitted Mr. Vaughan's remarks to the authors concerned and one of them, Mr. Montel, replied as follows:

« I was very interested by Mr. Vaughan's letter of 17th October 1962 concerning the articles published in Nos. 4 and 5 for 1960, on the subject of the instability of steel pipes embedded in concrete.

« I should like to make the following comments on Mr. Vaughan's remarks:

« It is true that the theoretical buckling

qués dans le tableau ci-dessous démontrent que l'équation de l'auteur correspond bien aux résultats des essais.

N° DES ESSAIS	PRESSION LIMITE (en kg/cm ²)		
	Essai	Montel	Vaughan
24-II	17,0	17,6	16,3
20-II	12,5	11,6	9,8
16-I	11,0	10,9	12,2
16-II	8,0	8,2	6,5
12-I	5,8	5,9	6,1
16-III	9,0	9,3	10,1
16-IV	8,0	10,0	11,5

La formule de M. Montel concorde mieux avec les résultats expérimentaux puisqu'elle est basée sur eux. Des essais complémentaires seraient souhaitables afin de savoir si, de la répétition des essais et de leur extension au-delà du domaine de conditions habituel, découlerait ou non la confirmation de la formule telle qu'elle est présentée ou une modification destinée à procurer un plus grand nombre de données. L'auteur pense que de tels essais entraîneraient une dispersion encore plus marquée des résultats. Il est logique de prévoir des écarts assez importants entre des résultats d'essais considérés individuellement et les valeurs calculées même par une méthode tenant soigneusement compte de tous les facteurs divers influant sur le résultat. La difficulté matérielle à mesurer le jeu (j) entre acier et béton et l'ovalité (u) entraîne nécessairement des erreurs, dont certaines peuvent être importantes. De plus, la longueur du tronçon d'essai, qui dans le cas considéré était inférieure au diamètre de la galerie, conduit aussi à des erreurs, dues à l'effet d'embout.

L'auteur ne saisit pas pourquoi M. Montel a donné à (j) une importance double de celle de l'ovalité (u), dans sa formule semi-empirique. Il lui semble que ces deux facteurs sont de la même importance.

E.W. VAUGHAN

du Cabinet Parsons, Brinckerhoff, Quade & Douglas, New York.

Nous avons soumis les remarques de M. Vaughan aux auteurs précités, dont l'un, M. Montel nous a envoyé la réponse suivante :

« J'ai pris connaissance, avec intérêt, de la lettre du 17 octobre 1962 de M. E.W. Vaughan, relative aux articles que vous avez publiés dans vos numéros 4 et 5 de 1960 sur les essais d'instabilité de conduites enrobées.

« Les observations présentées par M. Vaughan appellent les remarques suivantes :

« Les valeurs théoriques des pressions d'ins-

pressure values given in Table VI, based on the formulae of Messrs. Amstutz, Borot, Juillard and Variot, were arrived at without regard to out-of-roundness and for the following reason: since these authors themselves had omitted this factor from their equations we merely wished to compare our test results with existing theories. The fact that the equation based on our tests, which does include the out-of-roundness factor, gives, generally speaking, a more accurate approximation than the previous one, would seem to suggest that it is essential;

« As the Conclusions to both article show, I am in complete agreement with Mr. Vaughan when he indicates the necessity for more extensive testing to go more deeply into this problem and the fact that the results obtained will never achieve a high degree of mathematical accuracy, owing to the large number of factors involved and the practical impossibility of assigning precise values to them. It was for this reason, as I pointed out in the introduction to the second article, that I suggested a semi-empirical, i.e. approximate, equation as having the greatest practical utility, rather than striving for a fictitious strict mathematical accuracy;

« Justification for the fact that, in the equation, the clearance (j) is twice as important as (u) will be found in the calculations in the second article, chapter I, paragraph entitled "Introduction du jeu", which demonstrates that, within approximate limits, compensation for a clearance (j) without changing the wave length requires the out-of-roundness values to become $y + 2 j$. »

R. MONTEL.

tabilité indiquées au tableau VI pour les formules de MM. Amstutz, Borot, Juillard et Variot ont bien été calculées sans tenir compte de l'ovalité. La raison est que ces auteurs ne prévoyaient pas la prise en compte de ce facteur dans les équations qu'ils avaient proposées; nous avons donc voulu faire la comparaison entre les résultats d'essai et les théories existantes, telles que leurs auteurs les avaient conçues. Le fait que la formule basée sur nos essais, et tenant compte de l'ovalité, donne, dans l'ensemble, une meilleure approximation que les précédentes, paraît prouver qu'il convient d'introduire ce facteur;

« Comme le montrent les « conclusions » des deux articles, je suis parfaitement d'accord avec M. Vaughan pour penser que des essais plus nombreux sont nécessaires pour approfondir le problème, et que les résultats obtenus n'auront jamais une précision mathématique en raison du nombre de facteurs en cause et de l'impossibilité pratique de les évaluer exactement. C'est d'ailleurs la raison, signalée dans l'introduction du deuxième article, pour laquelle j'ai pensé qu'une formule semi-empirique, donc approximative, pouvait rendre des services puisque la précision paraît ici assez utopique;

« Quant au fait que le jeu (j) a, dans la formule, une importance double de celle de l'ovalité, il résulte du calcul exposé dans le deuxième article, chapitre I, paragraphe « Introduction du jeu ». Ce calcul montre, en effet, aux approximations près, que pour compenser un jeu (j) sans modifier la longueur de l'onde, il faut que l'ovalité devienne : $y + 2 j$. »

R. MONTEL.

