

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 (*)

PAR

R. TROISVALLETS

INGÉNIEUR A ÉLECTRICITÉ DE FRANCE
R.E.H. ALPES I

ET

R. MONTEL

INGÉNIEUR E.C.L.,
CHEF D'ÉTUDES A LA SOCIÉTÉ DES FORGES ET ATELIERS
DU CREUSOT

(Suite et fin)

Le problème étudié est celui de la résistance aux sous-pressions des blindages non renforcés. Les auteurs rendent compte d'importants essais effectués à ce sujet sur des tronçons bétonnés de conduites de diamètre 4 100 mm avec variation de l'épaisseur, des défauts de forme et du jeu entre tôle et béton. L'exposé porte sur la constitution des tronçons essayés, les méthodes et le matériel d'essai et de mesure (mesures de forme initiale, de contraintes et déformations en cours d'essai), et les résultats de mesures. L'analyse de ces résultats fait ressortir la répartition particulière des défauts de forme et leur influence sur la localisation de l'onde d'instabilité et sur la pression limite, et confirme l'effet du jeu entre tôle et béton. Ces résultats, ainsi que la comparaison avec diverses méthodes de calcul, amènent à conclure que le facteur défaut de forme, jusqu'ici négligé, doit être pris en considération pour déterminer la pression d'instabilité des blindages; la méthode utilisée pour la mesure de ces défauts à l'aide d'un gabarit donne des résultats cohérents.

The problem under consideration is that of the resistance of unreinforced linings to external pressures. The authors describe the large programme of tests they conducted on sections of concrete embedded 4,100 mm diameter pipe with varying wall thicknesses and with shape defects and clearances between the plating and the concrete. The article deals with the composition of the sections that were tested, with the methods and equipment used for the tests and measurements (measurement of initial shape followed by measurements of stress and strain during the tests), and gives the test results. Analysis of the results brings out the special pattern to which the shape defects conform as well as the effect they have on the localization of the collapse wave and on the limiting pressure. They also confirm the effect of the clearances between the concrete and the plating. These results and comparison with various method of computation lead to the conclusion that the shape defect factor, which has previously been neglected, should be allowed for when determining the pressure under which linings will collapse. The method of using a template to measure shape defects gives coherent results.

6. — EFFETS DES DÉFAUTS DE FORME ET DU JEU ENTRE TOLE ET BÉTON

6-1. — Défauts de forme.

6-1-1. — Localisation de l'onde d'instabilité :

a) Pour les cinq essais destructifs sans jeu de tronçons à extrémités libres, l'onde d'instabilité s'est formée sur, ou à proximité immédiate, de la génératrice qui comportait la plus grande moyenne d'écart de forme mesurés au gabarit de 50° (voir tableau III).

b) Pour les deux essais destructifs sans jeu de tronçons à extrémités renforcées, l'onde d'instabilité s'est formée à l'étage milieu sur la génératrice qui comportait le plus grand écart de forme mesuré au gabarit de 50°.

c) Pour les deux essais destructifs avec jeu (3° et 4° de 16), par contre, l'instabilité s'est manifestée sur une onde secondaire. Mais il y a lieu de considérer que :

— Pour le 16 n° 3, un premier essai a montré que les contraintes et déplacements étaient maximum sur la génératrice 10° qui présentait la plus grande moyenne d'écart au gabarit. Mais lors de l'essai final, vingt-quatre heures plus tard, les mesures ont révélé que les appuis de cette onde se sont incrustés profondément dans le béton, qui avait été dénaturé par le chauffage et était, entre temps, devenu pâteux dans cette zone sous l'effet de l'eau. Ce fait a été vérifié au démontage. Cette onde s'est ainsi trouvée bloquée; les contraintes et déplacements étaient, à pression égale, beaucoup plus faibles que la veille et l'instabilité s'est manifestée dans une autre zone où le béton était bon;

— Quant au quatrième tronçon de 16 mm, il avait subi déjà trois essais destructifs et

(*) Cf. *La Houille Blanche*, n° 4, p. 364.

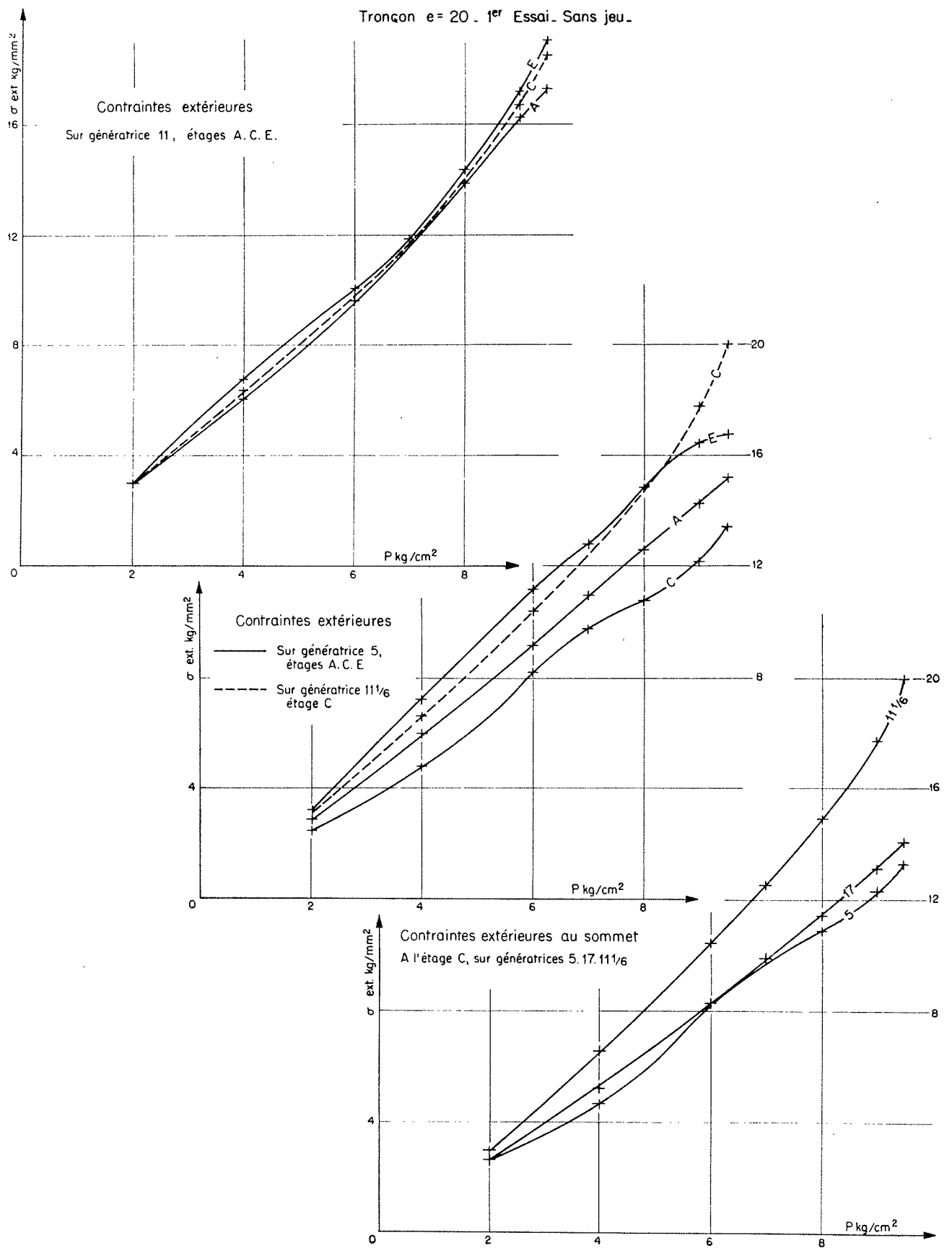
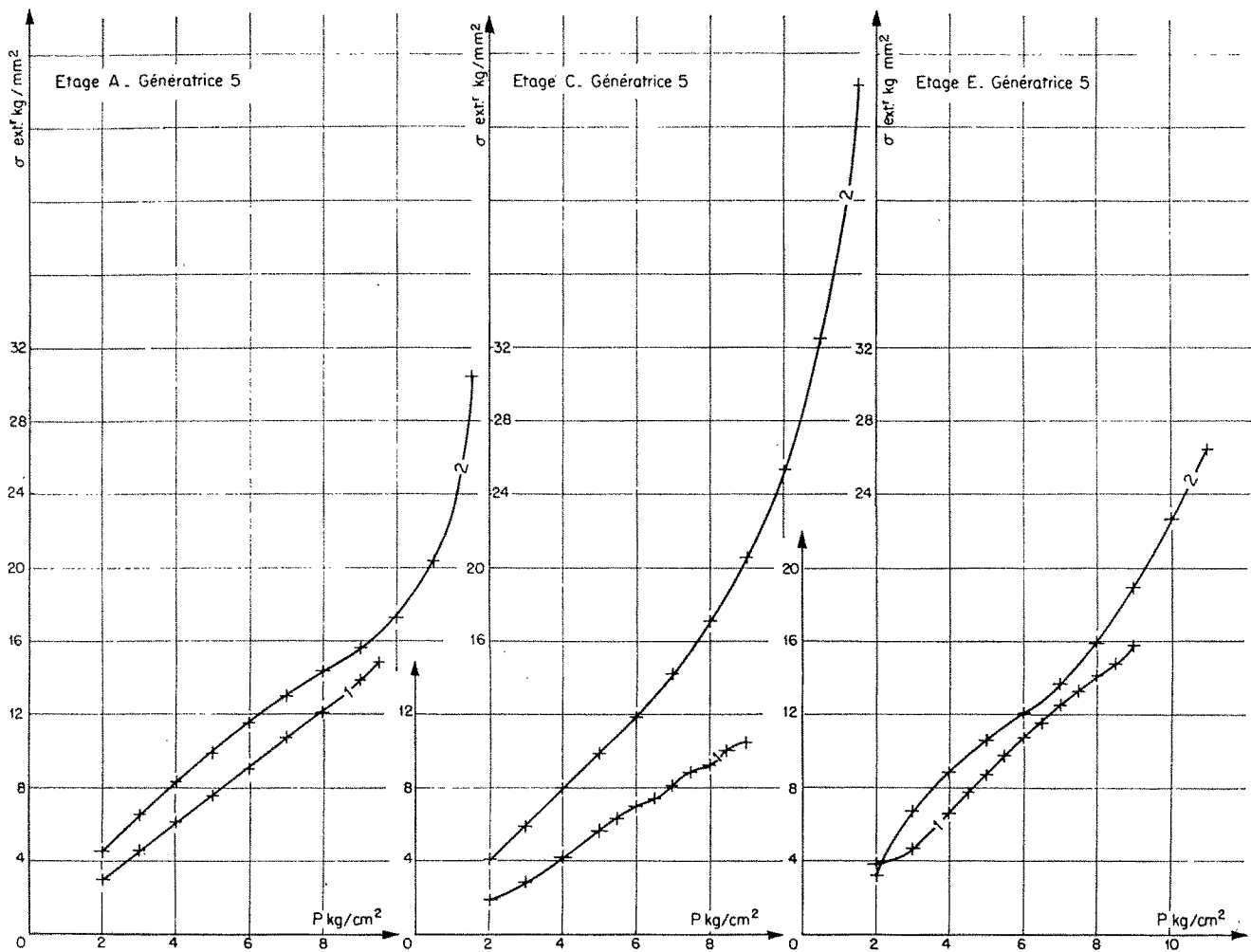
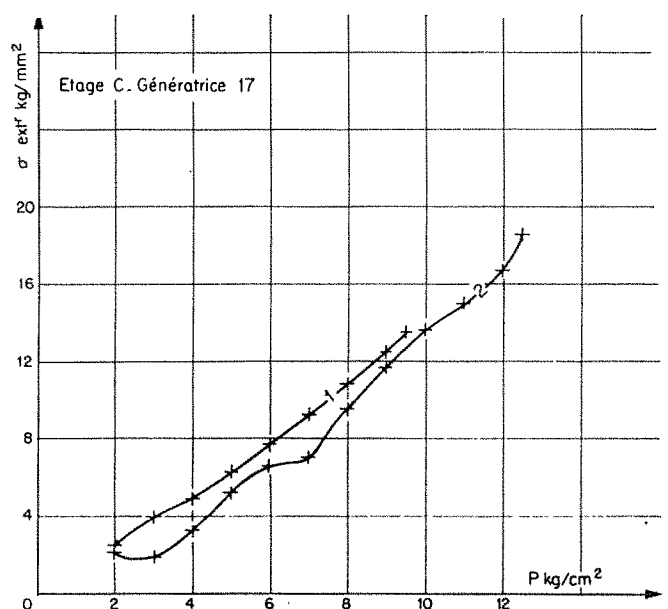
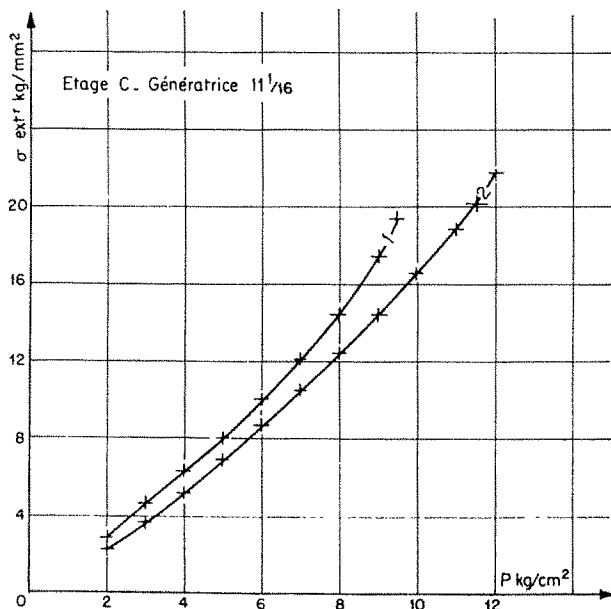


FIG. 20



Tronçon e = 20. Sans jeu. Comparaison des contraintes extérieures entre 1^{er} et 2^{me} essai.



avait fait l'objet de quatre calibrages poussés, de sorte que ses écarts de forme étaient très faibles, donc mesurés avec une précision relative réduite. La bosse s'est en outre formée à proximité d'une soudure de réparation; celle-ci comportait peut-être des écarts de forme passés inaperçus, car les mesures avaient été moins nombreuses qu'à l'habitude (pas de passage à la jauge télescopique) (voir nota).

d) Pour cinq des sept essais de tronçons libres, la bosse s'est formée à l'extrémité comportant le plus grand écart de la génératrice en cause. Les deux exceptions, 24 n° 2 et 16 n° 1, s'expliquent, l'un par un jeu résiduel à une extrémité et l'autre par un frottement sur le plateau inférieur, qui a d'ailleurs été éliminé pour les autres essais à la suite de cette constatation.

e) *L'ensemble de ces résultats conduit donc à énoncer que l'onde d'instabilité se localise sur la génératrice qui présente la plus grande moyenne d'écarts de forme mesurés au gabarit de 50°, et prend naissance à l'extrémité comportant le plus grand écart.*

NOTA. — De toute façon, il est certain que la présence simultanée d'un jeu dont la répartition est inégale et d'écarts de forme de faible valeur rend plus incertaine la localisation de l'onde.

6-1-2. — Influence sur la pression d'instabilité :

DOUBLE ESSAI DU TRONÇON DE 20 MM :

Ce tronçon a subi un premier essai non destructif sans jeu avec ses défauts de forme naturels. La plus mauvaise génératrice était la 11 ½ qui avait une moyenne d'écart de 4,72 mm et un écart maximum de 7,1 mm. Cet essai a été arrêté à 9,5 kg/cm², alors que les contraintes mesurées étaient encore inférieures à la limite élastique.

La figure 20 donne les contraintes extérieures :

- Pour les trois étages ACE sur génératrice 11, et à l'étage C sur génératrice 11 ½ (le maximum sur cette onde était attendu sur génératrice 11 et s'est en fait manifesté sur 11 ½ qui n'était équipée qu'à l'étage C);
- Pour les trois étages ACE au sommet de l'onde sur génératrice 5;
- Au sommet des ondes à l'étage C pour 11 ½ - 5 - 17.

On voit qu'à l'étage C l'onde 11 ½ l'emporte très nettement; à partir de 9 kg/cm², la génératrice 11, bien que n'étant pas exactement au

sommet l'emporte sur la 5, et la 11 ½ étage C également.

Il est donc net que la zone 11 - 11 ½ travaille plus que la zone 5.

Après cet essai, nous avons aggravé mécaniquement les défauts de forme de la génératrice 5 en tirant sur une tige vissée dans des trous taraudés de la tôle. L'opération s'est révélée extrêmement difficile par suite de la présence du béton qui gênait les déformations; les écarts obtenus ne sont donc pas uniformes et seul celui de l'étage B est important (voir tableau III). On voit sur la figure 6 que la répartition des écarts obtenus est analogue à celle relevée à l'état naturel sur le premier tronçon de 24 mm. On a ensuite procédé à une injection pour remplir l'espace créé entre tôle et béton par la déformation, puis le tronçon a subi son essai destructif.

La figure 21 donne la comparaison des contraintes extérieures au cours des deux essais pour :

- les étages ACE de la génératrice 5;
- l'étage C des génératrices 11 ½ et 17.

On voit que sur la génératrice 5, l'aggravation des écarts de forme a eu pour effet d'augmenter nettement les contraintes, plus particulièrement à l'étage C. Sur les autres génératrices 11 ½ et 17

Tronçon e = 20. n° 2. 2^{me} essai
Sans jeu.

Comparaison des contraintes extérieures,
étage C, génératrices 5. 11 ½ - 17.

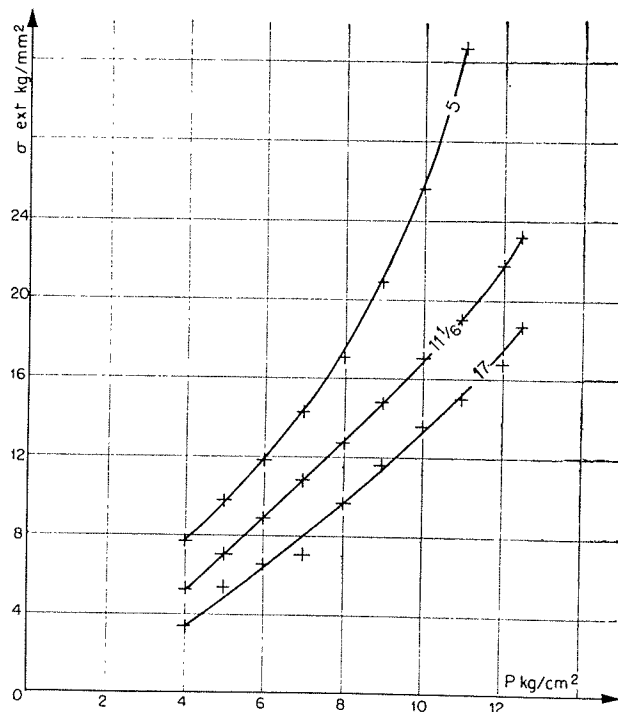


FIG. 22

par contre, les contraintes sont un peu plus faibles qu'au premier essai.

La figure 22 donne les contraintes extérieures au cours du deuxième essai à l'étage C sur 5 - 11 1/2 et 17. Par comparaison avec la figure 20, on voit que les génératrices se classent par ordre de contrainte décroissante 5 - 11 1/2 - 17, au lieu de 11 1/2 - 17 - 5 pour le premier essai.

L'onde d'instabilité s'est produite à l'étage A de la génératrice 5.

Il apparaît ainsi qu'une aggravation des défauts de forme a eu pour effet de modifier la localisation de l'onde d'instabilité et d'augmenter les contraintes; cette augmentation des contraintes amène à penser que l'amplitude des dé-

fauts de forme a une influence sur la pression d'instabilité.

ESSAIS DES PREMIER ET DEUXIÈME TRONÇONS DE 16 MM.

Ces deux tronçons ont été détruits sans jeu. Le premier a péri à 11 kg/cm² sur une génératrice présentant une moyenne d'écart de forme de 1,78 mm; le second, obtenu par réparation du premier, a péri à 8 kg/cm² pour une moyenne d'écart de 8 mm.

Les deux tronçons avaient subi un recuit pour éliminer les tensions internes.

La figure 23 donne les contraintes au sommet de l'onde pour les deux essais. On voit qu'elles

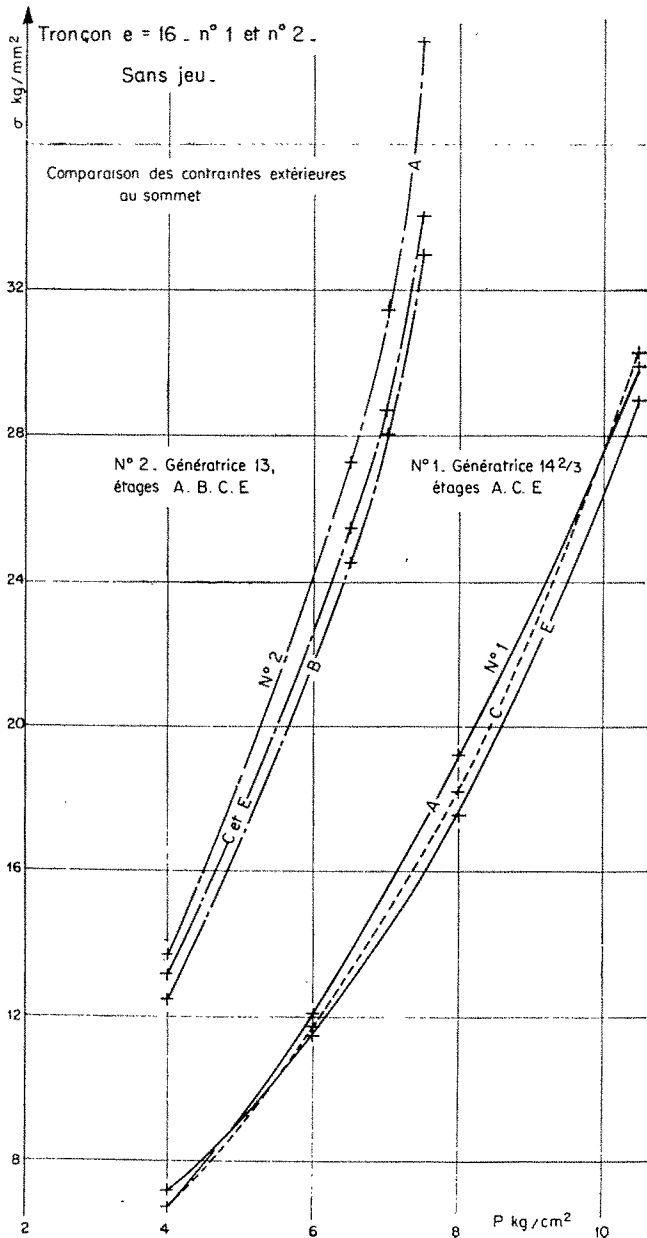


FIG. 23

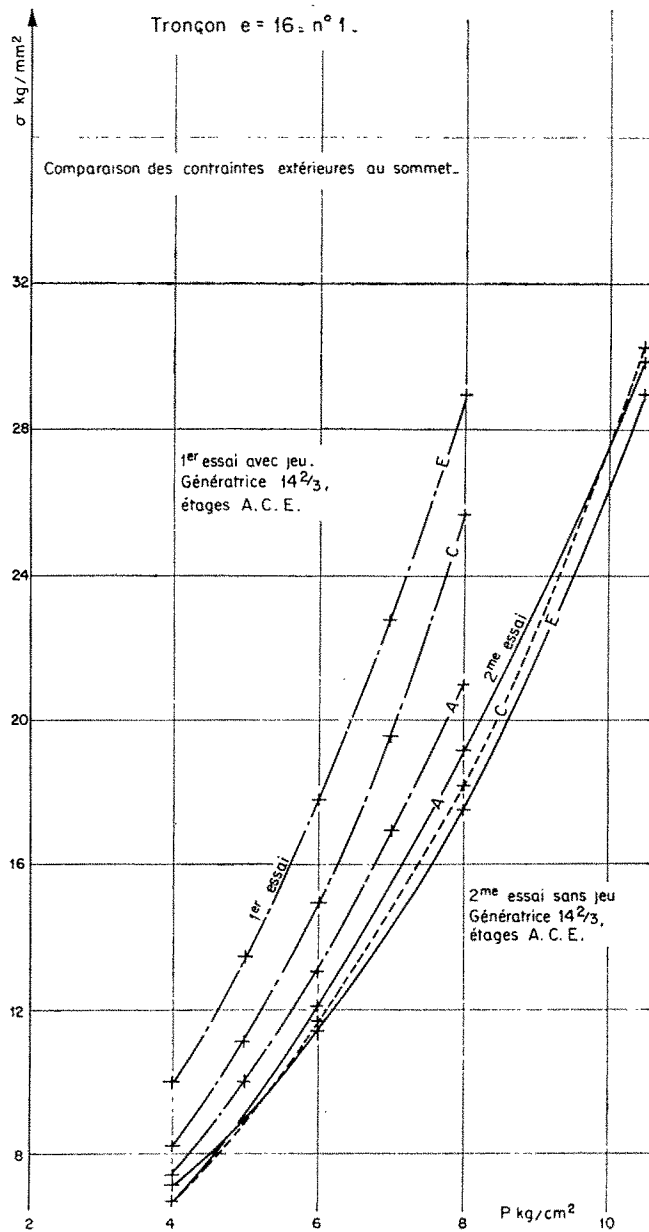


FIG. 24

sont, à pression égale, beaucoup plus élevées et croissent plus vite pour le deuxième tronçon que pour le premier.

Nous en concluons que l'aggravation des défauts de forme a eu pour effet de diminuer la pression d'instabilité.

Il convient de noter que le nombre d'ondes qui se sont développées est de 4 pour le premier tronçon et 1 pour le deuxième, bien que celui-ci ait, à l'état naturel, présenté plusieurs défauts plus importants que ceux du premier. Nous reviendrons plus loin sur ce point.

6-1-3. — En conclusion :

Les défauts de forme localisent l'onde d'instabilité et leur amplitude influe sur les contraintes et sur la pression limite d'instabilité.

6-2. — Jeu entre tôle et béton.

6-2-1. — Comparaison entre deux essais d'un même tronçon :

La figure 24 donne la contrainte au sommet étages A C E génératrice 14²/₃ du premier tronçon de 16 mm :

— au premier essai, non destructif, avec jeu moyen de 1,16 mm;

— au deuxième essai, destructif, sans jeu.

On voit que les contraintes sont, à pression égale, nettement moins élevées au deuxième essai qu'au premier. Cette différence est moins sensible pour l'étage A, et c'est précisément celui qui comportait le moins de jeu au premier essai (les moyennes de jeu par étage étaient en effet : A 0,96 mm - C 1,12 mm - E 1,41 mm).

La figure 25 donne les déplacements correspondant aux contraintes précédentes; les remarques sont identiques.

Les figures 26 et 27 donnent la comparaison des contraintes et déplacements aux étages A C E, génératrice 20 du premier tronçon de 12 :

— au premier essai, non destructif, avec jeu moyen de 5,2 mm;

— au deuxième essai, destructif, sans jeu.

Les différences ente les deux essais sont encore plus accentuées, car le jeu était beaucoup grand.

6-2-2. — Comparaison entre essais destructifs :

Le premier tronçon de 16 mm a péri à 11 kg/

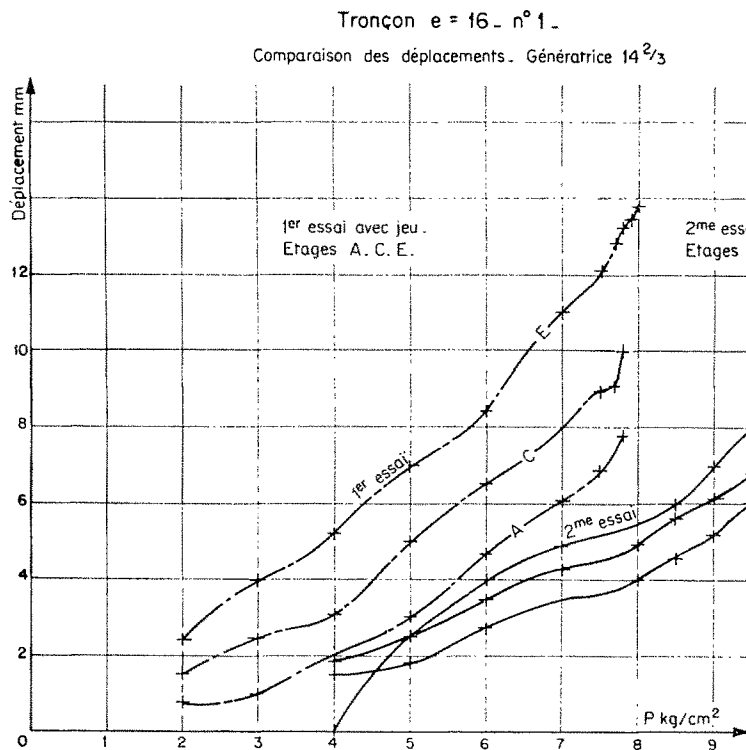


FIG. 25

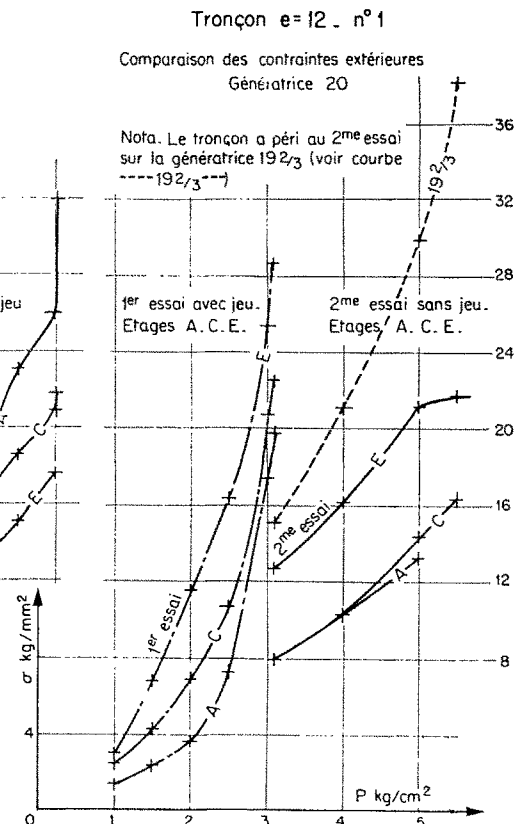


FIG. 26

TABLEAU VI

Essais sur l'instabilité des viroles bétonnées soumises à la pression extérieure

Viroles de diamètre intérieur 4 100 mm - L = 2 700 mm

DÉSIGNATION	CONDITIONS D'ESSAI						NOMBRE D'ONDES OBSERVÉ	PRESSION D'INSTABILITÉ					OBSERVATIONS
	Épaisseur (mm) (1)	Jeu (mm) (2)	Ovalité max. (mm) (3)	Ovalité moy. (mm)	U moy. épaisseur	Limite élastique (kg/mm ²)		Essai (4)	M. Amstutz (5)	M. Borot (5)	M. Juillard (5)	M. Varriot	
24 - II	23,8	# 0	5,2	4,12	0,173	34	4	17	16,3	26	15,1	21,3	Essai préliminaire avec jeu limité à 11 kg/cm ² . Léger jeu résiduel lors de l'essai final.
20 - II	20,5	0	18,5	6,52	0,318	32	3	12,5	11,9	20	12	13,6	Ovalité volontairement aggravée après essai préliminaire limité à 9,5 kg/cm ² .
16 - I	16,2	0	3,2	1,78	0,11	35	4	11	9,2	16	8,5	6,7	Virole recuite. Essai préliminaire avec jeu de 1,2 mm limité à 8 kg/cm ² .
16 - II	16,2	0	11	8	0,494	37	1	8	9,4	16,5	8,6	6,7	Virole recuite. Pas d'essai préliminaire avec jeu.
12 - I	12,2	0	8,6	3,3	0,271	34	3	5,8	5,4	10,5	5,3	2,9	Essai préliminaire avec jeu de 5,2 mm limité à 3,1 kg/cm ² .
16 - III	16,3	1,2	5	2,08	0,128	35	3	9	—	13,4	—	—	Le béton était resté pâteux, l'onde principale s'y est incrustée; instabilité sur une onde secondaire.
16 - IV	16,2	# 0,8	2,05	1,48	0,091	35	2	8	—	14,2	—	—	Instabilité sur une onde secondaire avec sommet très proche d'une soudure : ovalité réelle peut-être plus défavorable que prévu.
24 - I	24,4	1,1	13,8	5,98	0,245	33	3 ?	18,1	—	—	—	—	Extrémités liées au plateau supérieur et au plateau inférieur à l'aide d'un plat 40×4 soudé.
12 - II	12,4	0	4,45			34	6 ?	8,5	—	—	—	—	Virole munie de 2 renforts Γ 150×150×15 soudés en chevron à l'intérieur, à 1 980 mm d'axe en axe.
12 - II	12,4	0	3,9			36	6 ?	# 8,9	—	—	—	—	— 2° onde obtenue sur la virole ci-dessus.
12 - II	12,4	0	2,9			34	6 ?	9,6	—	—	—	—	— 3° onde obtenue sur la virole ci-dessus.

(1) Moyenne de l'épaisseur mesurée aux 5 étages de la génératrice située au sommet de l'onde.
(2) Moyenne du jeu mesuré sur l'ensemble de la virole.
(3) Ecart radial mesuré au gabarit de 50° sur la génératrice située au sommet de l'onde; la moyenne est celle des 5 étages.
(4) Pression à mi-hauteur de la virole.
(5) Les pressions ont été calculées dans l'hypothèse d'une seule onde conformément aux théories.

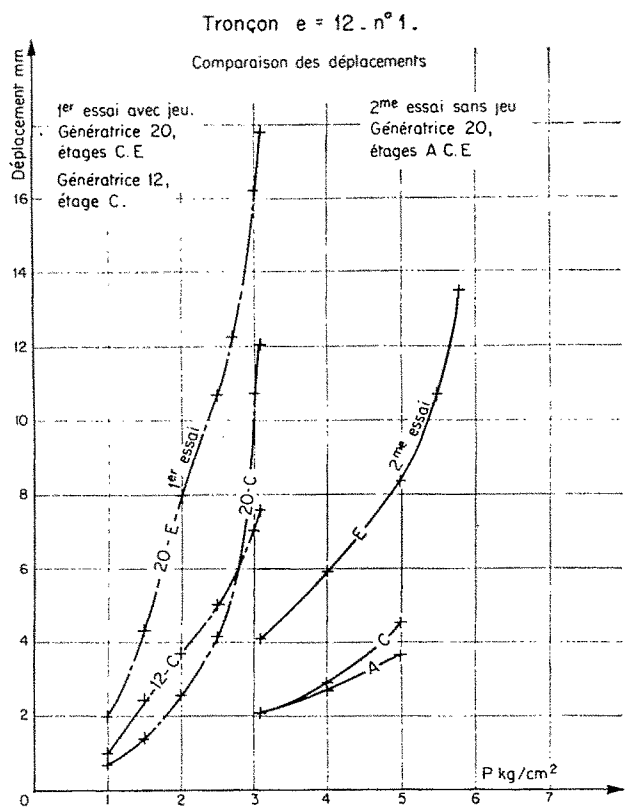


FIG. 27

cm² sans jeu sur une génératrice présentant un écart de forme moyen de 1,78 mm. Le deuxième tronçon de 16 mm a péri à 8 kg/cm² sans jeu, avec un écart moyen de 8 mm. La perte de 3 kg/cm² est due à la différence de défaut de forme de 6,22 mm.

Le troisième tronçon de 16 mm a péri à 9 kg/cm² pour un écart de forme moyen de 2,08 mm et avec un jeu moyen de 1,2 mm. La comparaison précédente montre que, par rapport au premier tronçon, la perte de 2 kg/cm² ne peut s'expliquer par la différence de défaut de forme de 0,3 mm, ce qui met en évidence l'effet du jeu.

NOTA. — Par contre, le quatrième tronçon de 16 mm a péri à 8 kg/cm² avec un jeu moyen de 0,8 mm et un écart moyen de 1,48 mm. Ce résultat est incompatible avec :

- Le 16 n° 3 qui, avec un jeu et un écart plus grands, a tenu jusqu'à 9 kg/cm²;
- Le 16 n° 1 qui a tenu à 8 kg/cm² lors de son essai non destructif, avec également un jeu et un écart plus grands.

Il est vraisemblable qu'un facteur non déterminé a faussé cet essai 16 n° 4. Voir à ce sujet le § 6-1-1 « Localisation de l'onde d'instabilité ».

7. — RÉSULTATS DES ESSAIS

Le tableau VI résume les conditions et résultats des neuf essais destructifs réalisés ainsi que les pressions d'instabilité calculées par quatre méthodes.

Nous laisserons de côté les essais 24-I et 12-II qui concernent des tuyaux renforcés.

7-1. — Essais sans jeu.

Le tableau VII donne les écarts entre les pressions calculées et celles résultant de l'essai; les pourcentages sont rapportés à la pression réelle et les signes + et - indiquent respectivement

TABLEAU VII

DÉSIGNATION	24 - II	20 - II	16 - I	16 - II	12 - I
Nombre d'ondes	4	3	4	1	3
M. Amstutz	— 4,1 %	— 4,7 %	— 16,4 %	+ 17,5 %	— 6,8 %
M. Borot	+ 53 %	+ 60 %	+ 45 %	+ 106 %	+ 81 %
M. Juillard	— 11,2 %	— 4 %	— 22,7 %	+ 6,2 %	— 8,6 %
M. Varriot	+ 25 %	+ 8 %	— 39 %	— 14 %	— 50 %

un chiffre théorique supérieur et inférieur au chiffre réel.

Les deux théories qui donnent les résultats les plus proches de ceux de l'expérience sont celles de M. Amstutz et de H. Juillard. Elles ne tiennent pas compte des défauts de forme et le fait qu'elles présentent les écarts maximums avec les essais 16-I et 16-II, qui comportaient respectivement le plus faible et le plus grand défaut, paraît confirmer l'influence de ceux-ci.

En outre, elles font appel à la notion de raccourcissement, exposée plus haut, en se plaçant dans l'hypothèse où celui-ci est compensé par une seule onde. Elles devraient donc normalement présenter un faible écart avec l'essai 16-II et donner des prévisions dont le pessimisme irait en croissant avec le nombre d'ondes réel. Il n'en est ainsi que pour celle de M. Juillard, qui ce-

pendant est un peu optimiste pour une onde et donne des écarts nettement différents pour les deux essais à quatre ondes (différence justifiable par les défauts de forme).

On notera également que le résultat des mesures de raccourcissement pour l'essai 16-II est incompatible avec l'une des hypothèses de base de ces deux théories (voir § 5.7.3).

Enfin, elles ne permettent pas de tenir compte du jeu entre tôle et béton.

7-2. — Essais avec jeu.

Seule la théorie de M. Borot permet de tenir compte du jeu et peut donc être appliquée aux essais 16-III et 16-IV. Elle donne avec les résultats de ces essais des écarts de +49% et +77%.

8. — CONCLUSION

Les nombreuses mesures exécutées au cours de ces essais permettent de suivre le déroulement du phénomène et, en particulier, confirment qu'il s'agit, dans le domaine de valeurs de R/e et de limite élastique exploré, d'une instabilité plastique.

Elles ont mis en évidence la répartition trilobée des défauts de forme, ainsi que leur profil particulier.

La comparaison des différents essais confirme l'effet du jeu entre tôle et béton et fait ressortir l'influence des défauts de forme sur la localisation de l'onde d'instabilité, sur les niveaux de contrainte et sur la valeur de la pression d'instabilité. Il semble donc nécessaire de se préoccuper à l'avenir du contrôle précis de ces défauts pour les constructions de ce genre; la méthode du gabarit de 50° paraît à ce sujet satisfaisante.

L'importance du problème de la stabilité des conduites bétonnées soumises à la pression extérieure est liée au nombre croissant des centrales souterraines; son acuité résulte de la tendance

générale à l'emploi, pour alimenter ces centrales, de blindages non renforcés et d'épaisseur réduite pour une utilisation rationnelle de la capacité de résistance du rocher. On conçoit, dans ces conditions, l'intérêt d'une solution complète de ce problème.

L'ensemble des éléments recueillis au cours de ces essais montre que le facteur défaut de forme, négligé jusqu'ici en première approximation, doit être pris en considération. On a également constaté que la portée de l'arc de tôle décollé du béton va en diminuant lorsque la pression augmente; cette réduction de portée résulte des déformations que prend l'arc par suite de sa tendance au flambage et elle s'oppose à ce dernier. Les constatations faites permettent d'espérer qu'une solution complète sur ces bases est possible.

Nous souhaitons que ces premiers résultats incitent à poursuivre dans cette voie, sur laquelle nos essais ne constituent qu'une étape.

BIBLIOGRAPHIE

E. AMSTUTZ. — Le flambage des galeries et des puits en charge.

Schweizerische Bauzeitung, 4 mars 1950.

H. BOROT. — Flambage d'un cylindre à paroi mince, placé dans une enveloppe rigide et soumis à une pression extérieure.

La Houille Blanche, n° 6, 1957.

II. JUILLARD. — Flambage des barreaux rectilignes, des segments arqués et des cylindres.

Schweizerische Bauzeitung, 9-16-23 août 1952.

E. VARRIOT. — Calcul de la pression extérieure limite applicable à une virole cylindrique légèrement aplatie, placée à l'intérieur d'une enveloppe cylindrique rigide sans tension initiale.

Le Génie Civil, 1^{er} février 1945.