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

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.

1. — OBJET

Le problème de la résistance aux sous-pressions des conduites forcées enrobées de béton se pose, du fait des infiltrations, pour les blindages souterrains et les conduites noyées dans les barrages.

Il a fait l'objet de nombreuses études dont les résultats sont assez divergents (Juillard, Amstutz, Variot, Borot, etc.).

La Société des Forges et Ateliers du Creusot

(Usines Schneider) a réalisé en 1958-59, pour le compte d'E.D.F., R.E.H. Alpes I, d'importants essais sur des tronçons de conduites de grand diamètre, non munies de renforts, soumises à ces conditions.

Le but immédiat était de vérifier les possibilités de résistance sans renforcement des épaisseurs de tôles prévues pour les quatre conduites du barrage de Monteynard, sur le Drac, condui-

tes de diamètre 4 100 mm, susceptibles d'être soumises, en cas de vidange brusque, à une pression extérieure de 9 à 14 kg/cm².

On s'est également proposé d'apporter une contribution à l'étude générale de ce phénomène d'instabilité en exécutant des mesures étendues

2. — PRINCIPE DES ESSAIS

2-1. — Caractéristiques des tuyaux.

Pour n'avoir pas à faire intervenir la similitude dans une étude déjà complexe, on décida d'essayer de tuyaux de même diamètre que ceux de l'ouvrage définitif, soit d'un diamètre de 4 100 mm.

La longueur des tronçons fut fixée à 2 700 mm en fonction des possibilités de réalisation pratique et, comme on le verra plus loin, on s'est efforcé de réaliser la liberté des extrémités, afin d'éliminer l'influence de la longueur.

On utilisa un acier Martin suivant spécification Confor C de la S.H.F., donnant $R = 48$ à 56 kg/mm^2 et $E = 28 \text{ kg/mm}^2$, réceptionné en forges. La limite élastique a été précisée par des éprouvettes prélevées en ateliers sur les viroles

et précises des défauts de forme, des contraintes et des déformations en cours d'essais et en faisant varier certains paramètres susceptibles d'intervenir dans son déroulement. On souhaitait plus particulièrement étudier l'influence éventuelle des défauts de forme.

détruites tant dans les parties déformées qu'ailleurs; les résultats de ces mesures figurent au tableau VI.

La figure 1 définit ces tronçons constitués de quatre tôles pour avoir une soudure circulaire et deux soudures longitudinales.

Seul, le tronçon de 16 mm a subi un traitement thermique de détente à 650° avant ses deux premiers essais.

2-2. — Déroulement-type de l'essai.

Le tronçon terminé est arrondi à l'aide de deux nappes de quatre tirants intérieurs pour amener son écart diamétral (au sens du cahier des charges SHF: différence entre le plus grand et le

FIG. 1
Développé d'un tronçon.

FIG. 2
Moule pour essai
de viroles sous
pression extérieure.

plus petit diamètre d'une même section) en dessous de 0,5 %.

Il est ensuite introduit dans un moule en acier cylindrique à axe vertical, représenté sur la figure 2.

L'espace annulaire d'environ 200 mm entre le tronçon en essai et le moule est alors rempli de béton avec armature.

Après prise de celui-ci, les tirants d'arrondissement sont enlevés et l'on procède aux mesures d'ovalité du tronçon.

Les instruments de mesure des contraintes et déformations sont mis en place d'après les résultats des mesures d'ovalité.

Pour l'essai proprement dit, on applique, à l'aide d'une pompe, une pression hydraulique sur les deux faces de l'anneau de béton (côté

tronçon et côté moule) et l'on vérifie sa bonne répartition. Grâce à cet équilibrage de la pression sur ses deux faces, et dans sa masse même par suite de la porosité, le béton (armé) n'a donc à supporter que les réactions locales d'appui du tronçon en essai. La pression ne s'exerce effectivement que sur le tronçon et le moule; la déformation de celui-ci n'a aucun effet sur le béton. Ce dernier présente ainsi une rigidité comparable à celle de la masse du barrage ou du rocher environnant un blindage. La mise en pression est réalisée par paliers et poussée jusqu'à la formation d'une onde irréversible dans la tôle du tronçon.

Les mesures sont faites aux paliers de mise en pression; certaines sont enregistrées en permanence.

ENSEMBLE DE L'INSTALLATION D'ESSAI

- Au premier plan, de gauche à droite : deux postes d'enregistrement de strain-gauges, postes d'équilibrage au pont, commutateurs à 32 voies, suiveur de spot.
- Au centre : tableau de commande, moule avec charpente intérieure indépendante.
- A l'arrière-plan : deux des enregistreurs de capteurs potentiométriques de déplacements.

3. — PROGRAMME ET RÉALISATION DES ESSAIS

3-1. — Variations des paramètres.

Le diamètre théorique des tuyaux et la nuance d'acier étant fixés, on se proposait de faire varier les trois paramètres :

- épaisseur des tôles,
- ovalité,
- jeu entre tôle et béton,

pour en étudier l'influence sur la pression d'instabilité.

Les variations de paramètres devaient être limitées au domaine escompté dans la pratique pour permettre l'exploitation des résultats dans le cas de Montcynard. Il convenait en outre de

séparer les différents facteurs pour dégager l'influence de chacun.

Le programme fut plusieurs fois étendu et amélioré en fonction des résultats acquis. En particulier, le nombre d'essais destructifs fut porté de 4 à 9, par réparation des tronçons; on adopta, en outre, le principe d'essais supplémentaires non destructifs pour multiplier les variations de paramètres, ce qui permit de réaliser au total 13 essais dans des conditions différentes.

3-1-1. — Variation de l'épaisseur :

On utilisa quatre épaisseurs de tôles: 12, 16, 20 et 24 mm.

Celles-ci ont été mesurées sur la périphérie

des tôles à raison d'environ 350 points par tronçon. Les chiffres relevés dans les zones où s'est manifestée l'instabilité sont indiqués au tableau VI.

3-1-2. — Variation de l'ovalité :

L'ovalité d'ensemble était réglée par les tirants intérieurs, mais les essais ont montré que les défauts locaux étaient déterminants. On étudia leur effet de deux manières :

- Sur le tronçon de 20 mm : en réalisant un premier essai, non destructif, avec ovalité naturelle, puis un essai destructif après aggravation volontaire d'un défaut initial mineur ;
- Sur le tronçon de 16 mm : qui subit un premier essai destructif avec une ovalité naturelle très faible, fut réparé en laissant subsister une ovalité beaucoup plus importante et détruit à nouveau.

3-1-3. — Variation du jeu :

- Le tronçon de 16 mm a subi quatre essais

destructifs dont deux sans jeu et deux avec jeu ;

- On fit également des essais non destructifs avec jeu sur les tronçons de 12, 16 et 24 mm.

3-1-4. — Essais avec renforcement :

Afin d'étendre les informations, il a été procédé à un essai du tronçon de 12 mm, muni de deux renforts.

En outre, lors du premier essai du tronçon de 24 mm, des difficultés provenant des joints avaient amené à réaliser l'étanchéité par soudure d'un plat entre extrémité du tronçon et moule. Cet essai a donc été effectué dans des conditions voisines de celles obtenues avec un renfort à chaque extrémité.

3-2. — Répartition des essais.

Au total : 13 essais, dont 9 destructifs, ont été réalisés.

Le tableau ci-dessous en définit les conditions :

TABLEAU I

	$e = 24 \text{ mm}$	$e = 20 \text{ mm}$	$e = 16 \text{ mm}$	$e = 12 \text{ mm}$
Essais destructifs	1 avec jeu et extrémités raidies 1 sans jeu et libre	1 sans jeu avec ovalité aggravée	1 sans jeu avec ovalité faible 1 sans jeu avec ovalité forte 2 avec jeu avec ovalité faible	1 sans jeu et libre 1 sans jeu avec renforts
Essais non destructifs	1 avec jeu et libre	1 sans jeu avec ovalité naturelle	1 avec jeu avec ovalité faible	1 avec jeu et libre

3-3. — Nature des mesures effectuées.

AVANT ESSAIS :

Les mesures ont porté sur :

- La vérification des épaisseurs de tôles ;
- Le contrôle des caractéristiques mécaniques, en particulier la limite élastique ;
- La forme des viroles qui a été étudiée, d'une part, dans son ensemble, à l'aide d'une jauge permettant la mesure des diamètres et aussi localement au moyen d'un gabarit.

EN COURS D'ESSAI :

Outre la pression, qui était enregistrée, on a mesuré :

- Les contraintes sur la face interne des tôles et, pour deux essais, en quelques points de

la face externe (côté béton) au moyen de strain-gauges. Celles-ci, au nombre de 40 à 70 suivant les essais, étaient en général réparties tout autour de la circonférence et concentrées sur les zones les plus faibles, afin d'avoir l'allure d'ensemble du phénomène et une analyse plus détaillée dans la zone d'instabilité ; certaines étaient enregistrées sur film.

— Les déformations de la tôle.

On mesurait les déformations radiales au moyen de 6 capteurs potentiométriques enregistrés et de comparateurs à lame flexible munis de strain-gauges au nombre de 40 à 60.

Ceux-ci ont également été utilisés lors des derniers essais pour la mesure des déplacements tangentiels de la tôle.

4. — DISPOSITIFS PARTICULIERS D'ESSAIS ET DE MESURE

4-1. — Joints d'extrémité.

Les joints assurant l'étanchéité entre les extrémités de virole et les plateaux du moule doivent répondre aux deux exigences suivantes :

- Tolérer le déplacement de plusieurs centimètres qui se produit avant l'instabilité;
- Créer le minimum de liaison. Il importe en effet que la virole puisse être considérée comme libre, puisque, d'une part, on désire étudier les tuyaux non renforcés et que, d'autre part, (TIMOSHENKO: *Stabilité élastique*, article 83) il faut que les extrémités soient libres pour que la longueur du tuyau n'intervienne pas.

Les joints en note de musique utilisés pour le premier tronçon de 24 mm n'ont pas donné satisfaction. Les viroles suivantes ont été munies de joints toriques en tube de caoutchouc (représentés sur la figure 2) dans lesquels on maintenait au cours de l'essai, avec une pompe à main, une pression d'eau supérieure de 2 à 4 kg/cm² à la pression d'essai. Le gonflement du joint permettait de compenser le déplacement de la tôle et ceci sans effet parasite en raison de la grande élasticité du caoutchouc. Nous avons vérifié en cours d'essai que les contraintes dans la tôle n'étaient pas sensiblement affectées par des variations, mêmes importantes, de l'excès de pression dans le joint. En fin d'essai, le joint éclatait lorsque la déformation de la tôle atteignait 60 à 100 mm, suivant les cas.

4-2. — Béton et injection.

4-2-1. — Béton :

COMPOSITION :

- sable: 0-5, 1 partie;
- gravillon: 5-20, 2 parties;
- 300 kg C.P.A. 250/315 par m³ de béton en place.

Fabriqué par des moyens de chantier sommaires (une bétonnière de 250 l, charge à la brouette), ce béton était mis en place à la benne (manutention au pont roulant), le couvercle supérieur du moule étant enlevé. Il était damé, car l'emploi d'un pervibrateur entraînait des fuites de laitance au joint inférieur.

Il comportait une armature composée d'un quadrillage de diamètre 12 mm, maille 200 mm,

lui permettant de supporter les efforts de traction dus aux réactions locales de la virole.

Des essais de compression effectués au préalable sur des éprouvettes cylindriques de 400 mm de diamètre ont donné: 283 kg/cm² à cinq jours; 300 kg/cm² à sept jours.

Pour le deuxième tronçon de 24 mm, nous avons été amenés, pour gagner du temps, à gâcher avec du ciment HRI 350/400, mais ce mélange présente l'inconvénient d'un retrait plus important; il est en outre plus sensible au chauffage pratiqué pour créer le jeu.

4-2-2. — Injections :

Certains tronçons ont été introduits dans le béton coulé autour d'un tronçon précédent d'épaisseur supérieure; pour d'autres, on a procédé à un essai préliminaire avec jeu, puis l'essai destructif a eu lieu sans jeu. Dans ces divers cas, l'espace entre tôle et béton a été rempli par injection d'un coulis de ciment.

La composition du coulis variait avec l'importance du jeu entre 0,5 et 1 kg de CPA ou de ciment fondu Lafarge tamisé par litre d'eau. La mise en place se faisait par gravité, le bidon étant placé sur la poutre du pont roulant à environ 8 m de la partie basse de la virole, soit en versant entre tôle et béton à la partie supérieure, soit au travers des bossages de mise en pression.

L'efficacité des injections était vérifiée par martelage; seule celle du deuxième tronçon de 24 mm a pu être estimée imparfaite. Par contre, la résistance de l'injection du troisième tronçon de 16 a été insuffisante, probablement en raison du chauffage (ciment alumineux).

4-3. — Jeu entre tôle et béton.

4-3-1. — Création du jeu :

Le jeu entre tôle et béton a été obtenu de deux façons différentes.

- a) Pour les premier, troisième et quatrième tronçons de 16 et le deuxième de 24, nous avons chauffé la virole avant et pendant le bétonnage et pendant le durcissement, soit environ quarante-huit heures. La section supérieure du tronçon était munie d'un couvercle; la température de la tôle était contrôlée par des thermomètres à bain d'huile, directement en contact avec la tôle. Les jeux radiaux moyens ainsi obtenus ont varié suivant les cas de 0,6 à 1,2 mm pour des températures de chauffage de 50 à 70°. Leur ré-

partition n'était pas très uniforme en raison de la libération des contraintes internes des tôles, lors de l'enlèvement des croisillons d'arrondissage et du fait des inégalités inévitables de température.

- b) Pour le premier tronçon de 12, le jeu a été obtenu par introduction dans le béton conservé après enlèvement du premier tronçon de 16 mm. Si les sections avaient été des cercles parfaits, nous aurions eu un jeu de 5,2 mm (différence d'épaisseur plus jeu du tronçon de 16). Mais, par suite des différences de forme et des libérations de contrainte à l'enlèvement des tirants d'arrondissage, il y eut des inégalités importantes.

4-3-2. — Mesure du jeu :

La mesure du jeu s'effectuait suivant deux méthodes:

- 1° *Avant l'essai*, on introduisait entre tôle et béton des fils calibrés par les trous percés dans la virole pour mise en pression ou prise de pression (12 orifices).
- 2° *Après essai destructif* et enlèvement de la virole, le coulis de ciment préalablement injecté pour supprimer le jeu se détachait facilement et l'on pouvait en mesurer l'épaisseur avec un pied à coulisse.

En outre, le jeu au droit des appuis de l'onde d'instabilité était mesuré par les comparateurs à lame sensibles au déplacement radial de la tôle.

Un essai de détermination du jeu au moyen d'un appareillage à ultra-sons, n'a pas donné de résultats positifs.

Nous donnons ci-après l'importance et la dispersion des jeux obtenus.

TABLEAU II

Premier tronçon de 24 mm,	
maxi : 2,5 mm; mini : 0 ; moyen : 1,04	
Deuxième tronçon de 24 mm,	
maxi : 1,5 mm; mini : 0,1; moyen : 0,6	
Premier tronçon de 16 mm,	
maxi : 2 mm; mini : 0,5; moyen : 1,16	
Troisième tronçon de 16 mm,	
maxi : 2 mm; mini : 0,4; moyen : 1,21	
Quatrième tronçon de 16 mm,	
maxi : 1 mm; mini : 0,6; moyen : 0,8	
Premier tronçon de 12 mm,	
maxi : 10 mm; mini : 2 ; moyen : 5	

4-4. — Dispositif de mise en pression et de contrôle.

Les 16 orifices de mise en pression du tron-

çon et du moule étaient reliés à un collecteur concentrique au moule sur lequel était branchée une pompe électrique par l'intermédiaire d'une vanne permettant de régler la pression par laminage. Le collecteur comportait également une vanne de purge permettant les baisses de pression ou la vidange. Enfin, le moule était muni d'une purge d'air utilisée au moment du remplissage.

Le contrôle de pression était assuré par 11 manomètres:

- 1 à la sortie de la pompe, 2 sur le collecteur, 4 sur le moule, et 4 sur le tronçon. Ces derniers étaient de deux types: 2 manomètres-étalons à lame métallique et 2 manopotentiomètres permettant l'enregistrement, soit sur Rapidgraph ou Sensigraph, soit sur film.

Pour mettre en pression on ouvrait légèrement la vanne de réglage en s'astreignant à ce que la montée n'excède pas 1 kg/cm² par minute. Avant de commencer les mesures, on vérifiait que la pression était bien équilibrée sur les quatre manomètres du tronçon. Pendant la durée des mesures à chaque palier, environ 45 minutes, on maintenait la pression constante en agissant si nécessaire sur la vanne d'admission pour compenser les suintements des joints, ou l'imprégnation du béton au début d'un essai. La stabilité était assurée à ± 50 gr/cm² pendant la durée des mesures.

4-5. — Mesures d'ovalité.

L'un des objectifs des essais était d'étudier l'influence éventuelle des défauts de forme sur la pression d'instabilité. Il importait donc d'établir de façon très précise la topographie des tronçons essayés. Ceci a été réalisé de deux façons différentes:

- En relevant la forme des viroles par rapport à un axe longitudinal arbitraire au moyen d'une jauge centrée sur cet axe;
- Par utilisation d'un gabarit.

Les viroles comportaient, à cet effet, un quadrillage de référence défini par 5 étages repérés A à E et 20 génératrices numérotées 1 à 20 (voir fig. 1).

4-5-1. — Jauge télescopique :

Le choix de l'axe est purement arbitraire et n'a pour but que de permettre une représentation de la forme par rapport à une référence. On a cependant cherché à se rapprocher de la notion théorique d'axe longitudinal d'un cylindre, afin d'apprécier l'écart entre la forme réelle

PASSAGE A
LA JAUGE TÉLESCOPIQUE

- Plan supérieur :
lunette à centrer.
- Plan inférieur :
jauge sur
sa colonne support.

et celle du cylindre parfait, notion généralement utilisée dans ce genre de problème.

Pratiquement, on procédait comme suit:

MATÉRIALISATION DE L'AXE ET RÉGLAGE:

Pour chacun des deux étages extrêmes, on traçait un triangle en appliquant trois fois une équerre à 90° dont l'un des côtés était égal au rayon théorique. L'équerre était orientée successivement sur les trois lobes que présentait en général la virole à l'état naturel, ces derniers étant au préalable situés par mesure rapide de l'étage inférieur (voir 5-1-1). Le centre de l'étage était alors matérialisé par un réticule au centre de gravité du triangle ainsi tracé. (Pratiquement, la longueur des côtés du triangle variait entre 0 et 8 mm). On alignait sur les deux réticules une lunette à centrer posée sur le moule et dont l'axe optique devenait ainsi l'axe des mesures. L'ensemble était alors réglé à l'aide de trois vérins pour que l'axe de la lunette devienne vertical.

La jauge était posée sur une colonne centrale

par l'intermédiaire d'un support dont on réglait l'horizontalité à l'aide de trois vis calantes et d'un niveau. Puis, en utilisant la lunette, on centrait le support (muni d'un réticule) sur l'axe optique à l'aide de trois vis horizontales. Ces opérations étaient reprises à chaque étage.

RÉALISATION DES MESURES:

La jauge était du type télescopique à air comprimé et comportait un vernier au vingtième de mm permettant de connaître sa longueur totale. Le support comportait également un vernier qui, à l'aide de graduations portées par la jauge, permettait de connaître la distance des extrémités à l'axe de mesure. On en déduisait la valeur des pseudo-rayons.

Les mesures étaient effectuées aux 5 étages sur les 20 génératrices et les tiers intermédiaires. Dans les zones d'instabilité probable, on repérait également les sixièmes de maille. Il y avait ainsi 400 à 500 points de mesure par tronçon.

Ce matériel a été construit et mis au point

par le Département des Essais Extérieurs de la Direction des Etudes et Recherches d'E.D.F., à Chatou.

PRÉCISION DES MESURES :

L'expérience a montré que le réglage d'un étage étant effectué, la dispersion des mesures était de $1/20^{\circ}$ à $1/10^{\circ}$ de mm. L'essai de la virole de 20 mm a permis de constater qu'à plusieurs semaines d'intervalle et après avoir démonté toute l'installation, y compris la lunette (un seul réticule de référence restant en place), on retrouvait les chiffres initiaux à $2/10^{\text{es}}$ de mm. près.

4-5-2. — Gabarit :

La corrélation entre les défauts de forme détectés à la jauge et les résultats d'essais ne donnant pas entière satisfaction, la mesure au gabarit a été introduite à partir de la première virole de 16 mm (elle peut d'ailleurs être réalisée

a posteriori d'après les résultats de la jauge).

L'angle d'ouverture du gabarit a été pris égal à 50° , qui est approximativement l'angle séparant les points de moment nul constatés sur les ondes (voir 5-2-1).

Le gabarit était muni d'un comparateur qui donnait directement l'écart de flèche par rapport à l'arc de cercle parfait de même ouverture. La précision des mesures a été trouvée de l'ordre de $5/10^{\text{es}}$ de mm.

4-6. — Mesures des contraintes et des déplacements.

4-6-1. — Mesures effectuées à partir d'extensomètres électriques à fil résistant :

Ces mesures ont été faites par la Division Technique Générale de l'E.D.F. qui a mis à notre disposition ses spécialistes et son matériel.

ENSEMBLE DES APPAREILS DE MESURE

Au premier plan, un enregistreur et le suiveur de spot.

4-6-1-1. — MESURE DES CONTRAINTES:

On utilisait des extensomètres AOIP de longueur active 22 ou 11 mm, coefficient de jauge 2 à 2,2, suivant les lots, garanti à $\pm 3\%$. Chaque jauge active, collée sur la tôle préalablement meulée, était montée avec une jauge de compensation; l'ensemble était protégé des ruissellements éventuels par un capot plastique.

Les variations de résistance des jauges, dont on déduit l'allongement, puis la contrainte, sont décelées à l'aide d'un galvanomètre branché dans la diagonale d'un pont de Wheatstone.

Mesures statiques à pression constante: Suivant les points, on procédait:

- Soit par méthode de zéro (équilibrage du pont);
- Soit par mesure, au moyen d'un « Suiveur de spot enregistreur » (Photodyne SEFRAM), de l'élongation du galvanomètre. Dans les deux cas, les jauges étaient alimentées en parallèle par groupe de 20 ou 32 suivant principe de la figure 3; la commutation du galvanomètre

FIG. 3
Schéma de montage
des « strain-gauges ».

était assurée par des commutateurs à mercure ou à contact d'argent. L'isolement était contrôlé fréquemment et il était possible d'éliminer rapidement les jauges éventuellement défaillantes.

Enregistrement à pression variable: Pour

Poste d'enregistrement
strain-gauges,
5 voies d'amplification
Sexta, en courant
à 1 000 périodes/seconde.

l'étude de l'évolution des contraintes au cours du phénomène final, nous disposions de 10 voies d'enregistrement sur film photographique: 5 alimentées en courant alternatif à 1 000 périodes/seconde, système d'amplification Sexta, et 5 alimentées en courant continu et montées en « pont de 4 jauges ». Chaque voie constituait un montage séparé. Le spot lumineux des galvanomètres impressionnait les films déroulés à vitesse constante par deux enregistreurs Larex et Baudoin.

4-6-1-2. — MESURE DES DÉPLACEMENTS:

Les déplacements ont été mesurés par un procédé extensométrique imaginé et mis au point par la D.T.G. et représenté sur les figures 4 et 5.

FIG. 4. — COMPARATEUR A LAME.

Montage pour mesure de déplacements radiaux.

FIG. 5. — COMPARATEUR A LAME.

Montage pour mesure de déplacements tangentiels.

Ce procédé consiste à employer des comparateurs composés d'une lame d'acier à ressort et de deux jauges collées, l'une à l'extrados, l'autre à l'intrados de la lame.

Par suite de son élasticité, la lame suit la tôle dans les deux sens et le déplacement est connu par mesure de la variation de résistance des jauges.

Cette mesure était faite, suivant les cas, par l'un des trois procédés décrits pour la mesure des contraintes.

Pour mesurer les raccourcissements sur les ondes (voir § 5-7), on a disposé une bande métallique flexible le long de l'arc à étudier. Une

extrémité de cette bande est fixée à la tôle et l'autre porte une pointe agissant sur un comparateur à lame solidaire du bâti. La bande doit épouser la forme de la tôle tout en glissant librement. Ce résultat est obtenu à l'aide de vis passant dans des trous oblongs.

4-6-1-3. — PRÉCISION DES MESURES:

Dans les conditions de ces essais, on peut estimer la précision des diverses mesures aux valeurs suivantes:

— *Mesures au pont statique:* Les erreurs de mesures sont jugées négligeables devant l'incertitude de $\pm 3\%$ sur le coefficient de jauge.

— *Mesures au suiveur de spot:* Fidélité de l'appareil, plus erreur de lecture: de l'ordre d'un millimètre, soit environ $\pm 0,3 \text{ kg/mm}^2$; plus l'incertitude de 3% sur le coefficient de jauge, soit pour 15 kg/mm^2 , par exemple, une erreur de $\pm 0,75 \text{ kg/mm}^2$, c'est-à-dire $\pm 5\%$.

Pour les comparateurs à lame, un tarage était nécessaire, ce qui élimine les coefficients de jauge, mais introduit l'erreur sur le tarage. Celle-ci est estimée à $\pm 4\%$; il s'y ajoute l'erreur de lecture et de fidélité, soit 1 mm lu , c'est-à-dire environ $0,1 \text{ mm vrai}$, soit pour 5 mm , par exemple, une erreur de $\pm 0,3 \text{ mm}$, c'est-à-dire $\pm 6\%$.

— *Enregistrements:* Erreur globale $\pm 0,5 \text{ mm}$, c'est-à-dire avec la sensibilité définie plus haut: $\pm 0,7 \text{ kg/mm}^2$, soit pour 15 kg/mm^2 , par exemple, une erreur de $\pm 4,7\%$.

NOTA. — Chaque essai mettait en jeu une centaine de voies de mesure. Pour l'ensemble des essais, le pourcentage des jauges dont le fonctionnement a paru douteux n'a pas excédé 5 à 6% .

4-6-2. — Mesures effectuées à partir de capteurs de déplacement à potentiomètre:

On utilisait six capteurs « SFIM » de 25 à 100 mm .

Le corps de l'appareil était fixé au bâti intérieur. L'extrémité de la tige était maintenue au contact de la tôle du tronçon par un ressort.

Les déplacements de la tige entraînent des variations de résistance agissant en montage potentiométrique sur deux enregistreurs SEFRAM Rapidgraph et Sensigraph.

Dans les conditions, souvent défavorables, d'utilisation des appareils, on peut estimer que les déplacements de palpeur étaient connus à environ $0,3 \text{ mm}$ près.

Détail
des enregistreurs de
capteurs de déplacements.

4-6-3. — Synchronisation et repérage :

On disposait :

- D'un circuit de tops automatiques envoyant un signal toutes les 10 secondes sur : le Rapidgraph, le Sensigraph, le Baudoin et le Larex;
- D'un deuxième circuit automatique donnant la seconde sur le Larex et le Baudoin;
- D'un circuit général à commande manuelle utilisé principalement pour repérer sur tous les enregistrements, les valeurs instantanées de la pression.

5. — ALLURE DU PHÉNOMÈNE

5-1. — Topographie des tronçons.

5-1-1. — Répartition des écarts de forme :

Elle est déduite des mesures faites à la jauge télescopique. Pour l'étudier, on a porté sur un diagramme circulaire les écarts entre les pseudo-rayons mesurés et le rayon moyen correspondant au développement. Pour rendre plus visibles les défauts de forme, les écarts ont été représentés à une échelle 125 fois plus grande que le rayon du cercle de référence; la figure ainsi obtenue ne représente donc pas la forme réelle (en particulier, points d'inflexion et courbures inverses n'existent pas dans la réalité et ne sont que la conséquence du changement d'échelle), mais matérialise la répartition des écarts par rapport à un cercle parfait.

La figure 6 donne divers diagrammes typiques. On remarque, pour les sections D et E du tronçon de 20 mm, que les écarts sont nettement

répartis en 3 lobes espacés presque exactement de 120° ; à partir de l'étage C, des lobes parasites se manifestent. Cette répartition trilobée à 120° se retrouve à un ou plusieurs étages pour tous les tronçons, comme en témoignent les autres graphiques.

5-1-2. — Valeurs des écarts de forme :

Le tableau III résume, d'autre part, les écarts radiaux relevés au gabarit de 50° pour les deux ou trois plus mauvaises génératrices de chaque tronçon.

5-1-3. — Effet du bétonnage et du recuit :

Le passage au gabarit était effectué sur les tronçons munis de leur dispositif d'arrondissement avant introduction dans le moule; les mesures à la jauge télescopique avaient lieu dans le moule après prise du béton et enlèvement des croisillons.

TABLEAU III

**Tableau de défauts de forme
mesurés au gabarit de 50°**

Les chiffres expriment, en millimètres, la différence entre la flèche de l'arc de tôle de 50° et celle de l'arc de cercle théorique de même ouverture.

Pour les conventions de signe, voir figure ci-contre.

On donne pour chaque tronçon :

Les écarts aux 5 étages des 2 ou 3 génératrices qui présentaient les chiffres les plus élevés, le maximum, la moyenne des 5 étages et le rapport de cette moyenne à l'épaisseur de la tôle.

Les points dans la 2^e colonne indiquent la génératrice sur laquelle s'est formée l'onde d'instabilité. Ceux dans les autres colonnes précisent l'étage où s'est formée la bosse.

Désignation du tronçon	Numéro de génératrice	Écarts d'étage					Écarts caractéristiques		
		A	B	C	D	E	U max.	U moy.	U moy. épaisseur
24 - I	1 •	13,8	11	4,5 •	4,2	— 3,6	13,8	*	*
	16	3,9	4,4	4,1	3,7	3,2	4,4	*	*
24 - II	2 b •	5,2	4,3	2,6	4,6	3,9 •	5,2	4,12	0,173
	6 a	5,25	3,85	0,05	2,05	4,9	5,25	3,22	0,133
	18 a	4,8	3,5	2,6	1,7	2,65	4,8	3,05	0,126
20 - I	11 ½	5	5,5	2,2	3,8	7,1	7,1	4,72	0,231
20 - I	5 (1 ^{er} essai)	0,86	1	1,2	0,7	0,9	1,2	0,93	0,046
20 - II	5 (2 ^e essai) •	1,2 •	18,5	7,4	5,2	0,3	18,5	6,52	0,32
16 - I	14 ½ •	— 0,3 •	0,2	3	3,2	2,8	3,2	1,78	0,11
	5 ½	2,7	0,7	0,7	1,2	2,8	2,8	1,62	0,10
16 - II	13 a •	11 •	8,65	6	7,5	6,85	11	8	0,494
	6	2,1	2,2	1,4	5,3	10,3	10,3	4,26	0,263
16 - III	10 a	8,3	8,65	6,1	4,9	2,9	8,35	6,17	0,381
	18 b •	— 1	0,15	3,25	3	5 •	5	2,08	0,128
16 - IV	6	2,4	1,65	— 0,8	1,9	3,9	3,9	1,81	0,11
	12 b •	1,25	0,55	1,65	2,05	1,9 •	2,05	1,48	0,09
	9 b	5,6	1	— 1,5	— 2,75	— 1,35	5,6	0,2	0,012
12 - I	20 •	1,6	1,5	0	4,8	8,6 •	8,6	3,3	0,271
	12 b	5,8	2,3	— 0,4	2,3	3,9	5,8	2,78	0,232
12 - II	11 ½ •	1,9	4,2	4,45 •	— 0,9	— 5,9	4,45	*	*
	18 ½ •	— 0,35	1,45	3,60 •	5,9	5,8	5,9	*	*
	6 ½ •	— 5,45	— 2,6	— 0,55 •	2,9	0,9	2,9	*	*

* Pour ces tronçons, les écarts moyens n'ont pas de sens en raison de la présence de renforts.

FIG. 6

Répartition des défauts de forme mesurés à la jauge.

On a cependant procédé, pour la plupart des tronçons, à une mesure de la section inférieure dans le moule avant bétonnage et enlèvement des croisillons. Ces mesures ont montré que la répartition trilobée des écarts de forme existait déjà avant le bétonnage et que celui-ci ne modifiait pas sensiblement les écarts.

D'autre part, le deuxième tronçon de 16 mm a été arrondi, muni de ses croisillons, passé une

première fois au gabarit, recuit à 650° en position verticale et passé une seconde fois au gabarit. Le tableau ci-dessous donne les résultats des deux mesures pour six génératrices (mêmes notations que pour le tableau III).

Les génératrices 6 - 13^a - 19^a sont situées, sensiblement à 120°, dans les creux des 3 lobes rentrant à l'intérieur du cercle de référence (voir fig. 6); on voit que le recuit a eu pour

TABLEAU IV

GÉNÉRATRICE N°	ETAT	ETAGE A	ETAGE B	ETAGE C	ETAGE D	ETAGE E	MOYENNE
6	avant	0,9	0,2	— 1,8	1,7	5,4	1,28
	après	2,1	2,2	1,4	5,3	10,3	4,26
13 ^a	avant	7	5	2,3	3,3	3,45	4,22
	après	11	8,65	6	7,5	6,85	8,0
19 ^a	avant	2,1	0,7	0,9	1,5	0,7	1,18
	après	2,5	1,3	2,35	2,9	1,4	2,09
2	avant	4,2	2,2	— 1	— 0,15	1,1	1,27
	après	3,75	1,9	— 1	— 1	— 0,05	0,72
8	avant	— 5	— 1,85	1,7	— 1,7	— 2,75	— 1,92
	après	— 4,4	— 2,25	0,1	— 4,35	— 5,8	— 3,34
15 ^a	avant	— 6,4	— 5,1	— 3,9	— 4,5	— 4,7	— 4,92
	après	— 9,9	— 7,9	— 5,55	— 5,8	— 6	— 7,04

effet d'aggraver très nettement leurs écarts par rapport au cercle de référence, les chiffres sont positifs et augmentent.

Les génératrices 2 - 8 - 15^a sont situées sur les sommets des lobes: l'effet du recuit a été également d'augmenter les écarts, puisque les chiffres positifs ont diminué et les négatifs augmenté.

Il apparaît donc que le recuit s'est traduit par une aggravation des défauts de forme dans les deux sens.

5-1-4. — Remarque :

Il est intéressant de noter que cette forme à trois lobes concerne des tronçons qui comportaient quatre soudures longitudinales et deux nappes de chacune quatre entretoises de mise au rond et qui, pour les manutentions, étaient suspendus en deux points.

Pour la fabrication: chacune des deux viroles a été constituée séparément; pour cela, les deux tôles la constituant ont été soudées entre elles à plat, puis l'ensemble de ces deux tôles a été cintré, la deuxième soudure longitudinale a ensuite été faite et l'ensemble a été calibré. Après quoi, les deux viroles ont été assemblées et soudées entre elles.

Pour la réparation, on a employé le mode opératoire suivant: découpage d'une bande longitudinale de largeur 2 700 mm, cintrage d'une bande identique prélevée dans une nouvelle tôle, mise en place et soudure de la nouvelle bande.

L'ensemble n'a pas été passé à la cintreuse, mais seulement calibré manuellement.

Malgré les différences entre les deux modes opératoires, la forme trilobée se retrouve sur les tronçons neufs et ceux réparés. Pour le tronçon de 24 mm, on remarque en outre sur la figure 6 que la réparation a eu pour effet d'inverser la position des lobes: les génératrices 1 - 8 - 16 qui, pour le tronçon neuf, étaient dans les creux, sont sur le sommet pour le tronçon réparé. Cette inversion se remarque aussi pour les tronçons 16-I et 16-II (le second résultant de la réparation du premier).

Nous examinerons maintenant les différents aspects du phénomène dans le cas où il n'y a pas de jeu entre la tôle et le béton; l'effet du jeu sera étudié plus loin.

5-2. — Répartition des contraintes et déplacements.

La figure 7 donne, à titre d'exemple, pour l'étage C du tronçon de 12 mm, la répartition des contraintes intérieures et les déplacements radiaux de la tôle, pour différentes pressions.

On constate que la tôle s'est décollée du béton dans trois zones génératrices: 6 à 9, 12 à 14 et 19 à 1. Ces trois zones sont celles qui compor-

REPARTITION DES CONTRAINTES INTÉRIEURES

FIG. 7

Tronçon $e = 12$.
n° 1. Etage C.

taient les trois lobes d'écart de forme représentés sur la figure 6. En outre, à ces décollements de la tôle, correspondent des singularités dans la répartition des contraintes mesurées sur la face intérieure de la tôle:

- au centre des parties décollées, on trouve une compression minimum qui, lorsque la pression croît, commence par augmenter avec elle, puis décroît et devient vers la fin une traction. Ces points sont dénommés « sommets des ondes »;
- de part et d'autre de chaque sommet, se trouve un point où la compression est maximum et croît sans cesse avec la pression;

ces points sont dénommés « cornes des ondes ».

5-2-1. — Hypothèse :

On peut donc émettre l'hypothèse que ces singularités sont dues à la flexion de la tôle qui s'écarte du béton: si cette flexion n'existait pas, la contrainte serait uniforme et égale à la compression simple due à la pression extérieure.

Dans l'hypothèse ci-dessus, la différence entre la contrainte réelle et la compression simple théorique doit représenter la contrainte de flexion sur la face intérieure de la tôle. La figure 8 donne la répartition de cette différence.

FIG. 8

Tronçon $e = 12$.
n° 1. Etage C.
Répartition des
contraintes intérieures
de flexion.

FIG. 9

Tronçon $e = 12$.
n° 1. Etage C.
Répartition des
contraintes extérieures.

On constate qu'il s'agit d'une traction dans les zones qui se sont le plus écartées du béton, et d'une compression dans les zones voisines des points restés en contact avec le béton; entre les deux zones se trouve, de part et d'autre du sommet, un point où la contrainte de flexion est égale à zéro, donc où le moment est nul. Ces sens de contrainte sont en accord avec l'hypothèse de la flexion et les déplacements observés.

Poursuivant le même raisonnement, si l'on inverse le signe de ces contraintes de flexion et qu'on y ajoute la compression simple, on doit obtenir la contrainte sur la fibre extérieure de la tôle (côté béton). Ceci permet de tracer la figure 9.

5-2-2. — Vérification :

Nous avons cherché à vérifier la validité de cette hypothèse en mesurant les contraintes sur la fibre extérieure de la tôle.

Ces mesures sont très délicates car les strain-gauges extérieures ont à supporter le chauffage, le bétonnage, la pression de l'eau et celle de la tôle sur le béton. Une première tentative sur le tronçon de 20 mm a échoué: certaines jauges ont été mouillées, les autres donnaient des indications incohérentes. Des essais de laboratoire ont alors permis de constater que l'application de la pression avait pour effet de faire épouser aux jauges les irrégularités de la surface de la tôle, ce qui fausse leurs indications: la pression agissait de même sur les plaquettes supports des jauges de compensation, introduisant une seconde erreur.

Une nouvelle tentative a été faite sur le premier tronçon de 16 mm avec les précautions suivantes: double capot de caoutchouc pour protection, polissage de la surface, jauges de compensation placées sur la face intérieure avec calorifugeage.

FIG. 10

Tronçon $e = 16$
n° 1. Etage C.
Répartition des
contraintes extérieures.

FIG. 11

Fig. 12

Les résultats lors du premier essai (avec jeu entre tôle et béton) ont été les suivants: 1 jauge avariée sur 6, écart entre la contrainte mesurée à l'extérieur et celle calculée à partir des mesures à l'intérieur:

1^{re} jauge: 1 %; 2^e jauge: 4 à 5 %; 3^e jauge: 6 à 8 %; 4^e jauge: 9 %; 5^e jauge: 19 %.

Compte tenu de l'incertitude de $\pm 3\%$ sur les coefficients de jauge et de la précision des mesures, l'hypothèse de superposition de la compression simple et d'une flexion paraît acceptable en première approximation. Nous l'avons donc utilisée pour évaluer les contraintes sur la face extérieure de la tôle à partir de celles mesurées sur la face intérieure.

La figure 10 donne, pour l'étage C du premier tronçon de 16 mm, la répartition des contraintes extérieures calculées suivant le procédé ci-dessus à partir des contraintes mesurées à l'intérieur. Les maxima sont situés sensiblement sur les génératrices $2\frac{1}{2}$ - $5\frac{1}{2}$ et $14\frac{1}{2}$, c'est-à-dire les zones d'écart radial maximum représentées sur la figure 6.

L'onde d'instabilité s'est produite sur la génératrice $14\frac{1}{2}$.

On notera que le minimum de contrainte extérieure sur la droite de cette onde s'est progressivement rapproché du sommet (jauge n° 29 à 4 kg/cm², jauge n° 25 à 10,5 kg/cm²), alors que celui de gauche est resté fixe. Ce phénomène a été constaté pour la plupart des essais.

Les résultats sont analogues pour les autres tronçons.

5-3. — Variation des contraintes et déplacements avec la pression.

La figure 11 donne les variations, en fonction de la pression:

- Du déplacement radial de la tôle au sommet de l'onde principale;
- De la contrainte intérieure au sommet (*);
- De la contrainte extérieure au sommet calculée d'après la précédente;
- De la contrainte intérieure de compression maximum dénommée « contrainte à la corne ».

Les tracés sont relatifs à l'étage C des premiers tronçons de 12, 16 et 20 mm et à l'étage A des deuxième tronçons de 24 et 16 mm. Pour ce dernier, il s'agit de l'étage où s'est formée l'onde d'instabilité; pour les quatre autres, il s'agit seulement du seul étage où les appareils de mesure

(*) Pour la commodité du dessin, le signe de cette contrainte a été inversé.

étaient assez nombreux pour localiser le sommet et les cornes de l'onde de déformation.

Il convient, en outre, de noter que l'espace minimum des jauges et palpeurs était de $1/6^e$ de maille, soit 107,5 mm; les contraintes et déplacements variant très rapidement au voisinage du sommet et des cornes, on ne peut être certain d'avoir relevé les maxima.

On constate que:

- Les déplacements sont pratiquement linéaires par rapport à la pression jusque vers 60 à 80 % de la pression d'instabilité, puis croissent plus vite qu'elle;
- La contrainte extérieure au sommet et la contrainte intérieure à la corne suivent une loi analogue, mais leur courbure apparaît en général plus tôt. La zone linéaire n'apparaît pas pour le tronçon de 12 mm et le deuxième de 16 mm, mais, pour ces deux essais, les mesures n'ont débuté qu'à 50 % de la pression d'instabilité;
- La contrainte intérieure au sommet est d'abord une compression, puis elle s'annule et change de signe. Ceci traduit le fait que la flexion croît plus vite que la compression simple et finit par l'emporter. Le deuxième tronçon de 16 fait exception, probablement pour la raison exposée ci-dessus et peut-être aussi parce que son ovalité initiale était plus importante.

Comme on le verra plus loin (§ 5-8-2), le phénomène était encore stable dans la zone non linéaire.

5-4. — Variation des contraintes et déplacements le long d'une génératrice (**).

La figure 12 donne la valeur de la contrainte extérieure au sommet de l'onde principale pour:

- le premier tronçon de 16 mm: étages A C E;
- le deuxième tronçon de 16 mm: étages A B C E;
- le tronçon de 20 mm: étages A-A^{bis} - C et D; et la contrainte intérieure à la corne pour le deuxième tronçon de 16 mm, étages A B C E.

On voit que les écarts sont faibles pour les deux premiers et plus importants pour le tronçon de 20 mm.

(Il y a lieu de remarquer que les contraintes supérieures à la limite élastique sont sans signification exacte, car elles sont calculées comme les autres à partir des allongements mesurés et du module d'élasticité.)

(**) Pour les figures 12 et suivantes, les contraintes représentées sont des compressions.

Fig. 13

Fig. 14

FIG. 15

La figure 13 donne les déplacements du sommet de l'onde à trois étages différents pour le deuxième tronçon de 16 mm et le deuxième de 24 mm.

5-5. — Contraintes et déplacements simultanés sur des génératrices différentes.

La figure 14 donne la variation de la contrainte extérieure au sommet pour quatre ondes du premier tronçon de 16 mm et trois ondes du tronçon de 20 mm. On voit que les contraintes augmentent jusqu'à la fin sur toutes les ondes.

La figure 15 donne les déplacements correspondant aux contraintes précédentes; leur accroissement est également continu. Pour le tronçon de 20 mm, les trois génératrices se classent dans le même ordre pour les contraintes et les déplacements.

Il n'en est pas de même pour celui de 16 mm;

ceci doit provenir de ce que, pour ce dernier, les palpeurs ne sont pas situés aux emplacements exacts des jauges et n'occupent pas pour toutes les génératrices la même position par rapport au sommet des ondes.

D'autre part, l'étude détaillée de la phase finale des enregistrements de capteurs de déplacements montre que les ondes secondaires ne s'effacent pas à l'instant où apparaît l'onde d'instabilité, mais un peu après la chute de pression. Lorsqu'il y a plusieurs ondes, celles-ci persistent donc jusqu'à la fin.

5-6. — Contraintes longitudinales.

Lors des premiers essais, on avait posé des jauges parallèlement aux génératrices pour connaître les contraintes longitudinales dans les zones intéressantes. Les mesures ont montré que, pour les tronçons non renforcés, ces con-

Strain-gauges,
comparateurs
à lame flexible et
capteurs de déplacements,
en place.

Strain-gauges,
comparateurs
à lame flexible et
capteurs de déplacements,
en place.

traintes étaient très faibles et que le fait d'en tenir compte affectait très peu le calcul des contraintes circulaires. Elles ont donc été négligées.

5-7. — Déplacements tangentiels.

5-7-1. — Principe :

Divers auteurs ont basé leurs études sur le raisonnement exposé ci-après.

FIG. 16

Avant application de la pression, la tôle épouse la forme du béton A D B C A (fig. 16). Lorsqu'on applique la pression extérieure, la tôle se décolle du béton sur une zone A B et reste plaquée au béton sur l'arc B C A; la partie décollée est l'onde où se manifestera l'instabilité.

Or, la pression a pour effet de comprimer le

FIG. 17

métal, donc la longueur développée totale de la tôle doit diminuer.

Il faut donc avoir: $AD'BCA < ADBCA$.

L'arc BCA étant commun aux deux contours, cette inégalité se ramène à: $AD'B < ADB$.

Autrement dit, entre les points A et B du béton, la tôle suit sous pression un chemin AD'B plus court que l'arc initial ADB: il se forme une

onde par décollement partiel de la tôle, de telle sorte que son périmètre total diminue, bien qu'un certain arc reste en contact avec le béton.

D'autre part, la tôle de l'arc BCA est comprimée par la pression; si l'on supprime cette dernière, les molécules de tôle qui se trouvaient en face des points E et F du béton viendront en E' et F'; de même, les molécules qui coïncidaient avec les points A et B du béton viendront en A' et B' (voir fig. 17).

5-7-2. — Application : (voir figure 18) :

Pour étudier la validité de ces hypothèses, nous avons placé:

- En deux points M et N de la tôle au repos, des comparateurs à lame indiquant les déplacements tangentiels;
- Entre les points M et N, une bande flexible épousant la forme de la tôle fixée à la tôle en M et dont l'extrémité libre coïncide avec N et comporte une pointe agissant sur un troisième comparateur à lame tangential.

FIG. 18

Lorsqu'on applique la pression extérieure, la tôle se décolle du béton sur un arc A B. Examinons ce que sera le déplacement de l'extrémité libre de la bande flexible.

1° Supposons que la molécule de la tôle M reste fixe par rapport au béton (voir fig. 18).

On a $MP'N < MPN$.

Comme la longueur de la bande flexible ne varie pas et qu'elle doit parcourir entre les mêmes points M et N un chemin plus court, son extrémité libre se déplacera de NR tel que: $NR = MPN - MP'N$.

Les arcs MA et BN étant communs aux deux trajets, cette égalité peut aussi s'écrire:

$$NR = APB - AP'B.$$

Donc, la différence de longueur entre les arcs APB et AP'B est égale au déplacement mesuré de l'extrémité libre de la bande.

2° Si, suivant la théorie exposée plus haut, la molécule de tôle M vient en M': toute la bande se déplacera de MM', le point R viendra en R' tel que $RR' = MM'$, le déplacement mesuré sera NR' et, pour avoir la différence de longueur recherchée: $APB - AP'B$, il faudra ajouter le dé-

placement MM' au déplacement mesuré NR' de l'extrémité libre de la bande.

5-7-3. — Résultats :

Ce dispositif a été appliqué aux deuxième et troisième tronçons de 16 mm et au deuxième de 12 mm. Son fonctionnement n'a été satisfaisant que dans le premier cas; pour les autres, il a été perturbé par un coincement de la lame flexible et par le fait que les points M et N se sont trouvés sur la zone décollée du béton et que les déplacements radiaux importants ont faussé les indications des comparateurs tangentiels.

Le deuxième tronçon de 16 mm comportait une seule onde centrée sur la génératrice n° 13. Les mesures ont été faites aux étages A et C; le point fixe M de la bande flexible était sur la génératrice n° 12 et son extrémité mobile sur la génératrice n° 14; les comparateurs à lame pour mesure des déplacements tangentiels de la tôle étaient sur les génératrices 12 et 14 1/3 (ce dernier ne coïncidait pas exactement avec l'extrémité libre de la bande pour des raisons d'encombrement).

— Raccourcissement total de l'onde (NR' + MM') :

- étage A 7,17 mm,
- étage C 6,96 mm,
- écart 3 %. — Moyenne 7,07 mm.

Or, à 7,5 kg/cm², le raccourcissement théorique correspondant à la compression simple sur la totalité de la circonférence est de 5,61 mm [en adoptant la valeur de 22 000 pour le module d'élasticité apparent $E/(1 - \nu^2)$. L'angle extérieur entre les deux comparateurs de déplacement tangentiels est de 318°; le raccourcissement théorique sur cet angle est de 4,96 mm.

On voit donc que :

- La somme des déplacements tangentiels trouvée égale à 5,96 mm est supérieure de 20 % au chiffre théorique de 4,96 mm;
- Le raccourcissement total de l'onde trouvé égal à 7,07 mm est supérieur de 18,5 % à la somme des déplacements tangentiels réels et de 26 % au raccourcissement théorique de toute la circonférence égal à 5,61 mm.

Si le raccourcissement propre de l'arc de 36°

Tronçon e = 16. n° 2. Déplacements tangentiels

FIG. 19

La figure 19 donne le résultat des mesures. On voit que les déplacements croissent un peu plus vite que la pression.

A 7,5 kg/cm², c'est-à-dire pour une pression égale à 93,7 % de la pression d'instabilité, on trouve :

— Somme des déplacements tangentiels (génératrices 12 et 14 1/3) :

- étage A 6,06 mm,
- étage C 5,86 mm,
- écart 3,5 %. — Moyenne 5,96 mm.

couvert par la bande flexible (entre les génératrices 12 et 14) suivait la même loi que celui de 318° entre génératrices 14 1/3 et 12, il serait :

$$5,96 \times (36/318) = 0,675 \text{ mm}$$

alors qu'il est en fait :

$$7,07 - 5,96 (324/318) = 1 \text{ mm}$$

Le raccourcissement propre de cet arc est donc supérieur de 48 % à celui d'un arc de même ouverture resté collé sur le béton.

Pour les autres paliers de mesure, les résul-

tats sont analogues (à 4 kg/cm², le raccourcissement total est supérieur de 12 % au chiffre théorique; à 6,5 kg/cm², l'écart est de 18 %).

Le fonctionnement des appareils a paru très satisfaisant:

- Les écarts entre les mesures aux étages A et C n'excèdent pas 3,5 %;
- La dissymétrie des déplacements se conserve aux deux étages;
- Au cours de l'essai, après avoir atteint une pression de 6,5 kg/cm² on est redescendu à 4 kg/cm² puis remonté à 6,5 kg/cm²: les écarts de mesure entre les deux paliers à 6,5 kg/cm² ont varié entre 0,01 et 0,06 mm.

5-8. — Manifestation de l'instabilité.

5-8-1. — Formation d'une onde instable :

Lors de la mise sous pression extérieure, on constate, comme exposé plus haut, le développement d'ondes de déformation qui s'étendent sur toute la longueur du tronçon. Sur ces ondes, la tôle s'écarte progressivement du béton lorsque la pression augmente, mais la courbure reste de même sens qu'à l'état initial.

Vue de l'une des bosses obtenues sur la deuxième virole de 12 mm renforcée.

Pour une certaine valeur de la pression, la courbure d'une de ces ondes s'inverse brusquement d'où instabilité et formation d'une bosse dans la tôle.

Pour les sept tronçons non renforcés que nous avons essayés, la bosse s'est formée à une extrémité. Cette localisation provient sans doute de la discontinuité d'extrémité (module d'élasticité apparent plus faible qu'en pleine tôle). Le phénomène ne pouvait s'étendre sur toute la hauteur du tronçon, car dès l'apparition de la bosse, le joint se dilatait considérablement et éclatait, et la pression tombait.

5-8-2. — Effet du temps. — Réversibilité :

Pour six des neuf essais destructifs réalisés, l'instabilité s'est manifestée au cours d'une montée de pression; pour les trois autres, la bosse s'est formée après un certain temps de maintien à pression constante: 40 secondes pour le premier tronçon de 16 mm, 4 minutes pour le deuxième de 24 mm et 17 minutes pour le quatrième de 16 mm.

Ceci appelle les deux remarques suivantes:

a) *Il est donc vraisemblable* que la pression limite des six autres essais a été surestimée par rapport à celles de ces trois derniers. A ce sujet, il y a lieu de considérer que:

- Les montées en pression étaient faites à l'allure modérée de 1 kg/cm² par minute;
- Dans plusieurs cas, la dernière série de mesures a été faite à une pression très voisine de la pression limite (88 % pour le tronçon de 20 mm, 94 % pour le premier de 12 mm et 95 % pour le deuxième de 16 mm) sans que l'on ait constaté de variations sensibles des contraintes et déplacements entre le début et la fin du palier, c'est-à-dire à environ une heure d'intervalle; puis le tronçon a péri instantanément au cours de la montée suivante.

Dans ces conditions, nous considérons que la pression limite des tronçons qui ont péri en cours de montée en pression a été faussée de moins de 5 % par rapport aux autres cas.

b) *On peut, d'autre part, se demander* si pour tous les essais, l'instabilité ne se serait pas manifestée à une pression plus basse après un temps plus long. Mais nous avons procédé sur plusieurs tronçons à des montées et descentes successives de pression qui ont montré que, malgré une certaine hystérésis à la descente, le phénomène était encore réversible pour des valeurs de la pression proches de la limite. Le deuxième tronçon de 16 mm, par exemple, a subi, en deux jours, quatre montées à 6,5 kg/

cm². Ce tronçon ayant ensuite péri à 8 kg/cm², la pression de 6,5 kg/cm² représente donc 81 % de la limite.

Le tableau V ci-après résume les résultats en kg/mm² des quatre lectures à 6,5 kg/cm² sur l'onde principale à l'étage A (où s'est ensuite formée la bosse) pour la jauge n° 48 située au sommet, les jauges n°s 52 et 65 situées sur les deux cornes.

On a indiqué également pour les deux premières jauges l'écart entre la mesure initiale à 1 kg/cm² et celle du retour à la même pression après la deuxième montée à 6 kg/cm² (la mesure n'a pas été faite pour la troisième jauge).

TABLEAU V

JAUGE N°	1 ^{re} MONTÉE	2 ^e MONTÉE	ECART DE RETOUR à 1 kg/cm ²	3 ^e MONTÉE	4 ^e MONTÉE
48	+ 11,75	+ 10,6	— 0,28	+ 10,48	+ 10,7
52	— 25	— 23,85	— 0,11	— 22,35	— 22,36
65	— 22,1	— 21,3		— 19,7	— 19,7

Les écarts entre les mesures successives diminuent, pour devenir négligeables entre les deux dernières montées; les retours à 1 kg/cm² sont excellents. Le phénomène ne s'aggrave donc pas de lui-même: il est encore stable à 81 % de la pression limite.

Il paraît vraisemblable que cette stabilité se prolonge au moins tant que la contrainte n'atteint pas la limite élastique en un point sur la hauteur de la génératrice. Or, mis à part le tronçon de 20 mm, les contraintes n'ont atteint la limite élastique que très peu avant la formation de l'onde inversée, comme on le voit sur les figures précédentes. Pour le tronçon de 20 mm, on a observé à un étage des contraintes égales à la limite élastique au palier de 11 kg/cm² (limite: 12,5 kg/cm²), mais il est resté stable à cette pression pendant toute la durée des mesures, soit environ une heure.

En conclusion, nous ne pensons pas que les pressions d'instabilité trouvées au cours des essais soient entachées d'erreurs importantes du fait du facteur temps.

5-8-3. — Contrainte à la limite d'instabilité :

On a vu qu'il y avait, au cours de la montée en pression, des différences entre les contraintes maximales aux différents étages. Ces différences sont attribuées à l'inégalité des défauts de forme.

L'ensemble des essais a montré que l'instabilité ne se manifestait pas avant que, sur toute la hauteur du tronçon, la contrainte extérieure de compression au sommet de l'onde et la contrainte intérieure de compression à la corne atteignent la limite élastique. On a trouvé que la bosse se formait lorsque les contraintes atteignaient la limite élastique à l'étage qui travaillait le moins.

(A suivre.)

Pour collaboration à Etudes Technico-Economiques de mise en valeur hydro-agricole recherchons :

JEUNE ÉCONOMISTE

ayant notions hydro-agricoles ou Ingénieur

HYDRO-AGRICOLE

ayant notions pratiques économie politique.

Ecrire : B.C.E.O.M., 90, boulevard Latour-Maubourg, Paris (7^e).