

# Essais en laboratoire sur des cadres circulaires et elliptiques

par H. van DUYSE,  
Ingénieur principal à Inchar.

## SAMENVATTING

Met het doel te bepalen aan welke krachten gesloten metalen ramen kunnen weerstaan, werden laboratoriumproeven uitgevoerd op cirkelvormige en elliptische, op starre en meegeevende ramen.

Tijdens deze proeven werden radiale krachten uitgeoefend op een vierde van de buitenomtrek der ramen. De belastingen werden opgedreven tot het raam knikte. De in het staal optredende spanningen werden elektrisch gemeten.

Al de proeven gebeurden op twee ramen, geplaatst op ongeveer 35 cm afstand van as tot as.

De proeven uitgevoerd op twee verschillende typen van ramen gaven de volgende uitslagen :

### A. Ramen van de firma Rhestahl-Wanheim (profiel 29,5 kg/m)

1. Starre cirkelvormige ring met een inwendige diameter van 4,32 m :
  - maximum belasting vóór knik : 298 t
  - vermindering van de nuttige doorsnede : 0 %
  - de elasticiteitsgrens van het staal werd op geen enkel meetpunt bereikt.
2. Dubbele ring, star en meegevend :
  - maximum belasting vóór knik : 280 t
  - vermindering van de nuttige doorsnede : 4,6 %
  - de elasticiteitsgrens van het staal werd bereikt aan 120 t.

### B. Ramen van de firma Heintzmann (profiel 36 kg/m)

1. Starre cirkelvormige ring met een inwendige doormeter van 4,32 m :
  - maximum belasting vóór knik : 320 t
  - vermindering van de nuttige doorsnede : 1,4 %
  - de elasticiteitsgrens van het staal werd bereikt aan 138 t.

## RESUME

Afin de connaître les sollicitations auxquelles des cadres métalliques fermés peuvent résister, des essais en laboratoire ont été effectués sur des cadres circulaires et elliptiques, rigides ou coulissants.

Ces essais ont consisté à exercer des efforts radiaux sur un quart de la circonférence extérieure des cadres. Les efforts ont été augmentés jusqu'au flambage de l'anneau. Les tensions développées dans l'acier ont été mesurées à l'aide de jauges de contraintes.

Les essais ont eu lieu chaque fois sur des anneaux constitués de deux cadres placés environ à 35 cm d'axe en axe.

Les résultats des essais effectués sur deux profils différents de cadres sont les suivants :

### A. Cadres de la firme Rhestahl-Wanheim (profiel 29,5 kg/m)

1. Anneau circulaire rigide de 4,32 m de diamètre intérieur :
  - charge maximum avant flambage : 298 t
  - diminution de la section utile : 0 %
  - la limite élastique de l'acier n'a été atteinte avec aucune jauge.

2. Double anneau rigide et coulissant :
  - charge maximum avant flambage : 280 t
  - diminution de section utile : 4,6 %
  - la limite élastique de l'acier a été atteinte à 120 t.

### B. Cadres de la firme Heintzmann (profiel de 36 kg/m)

1. Anneau circulaire rigide de 4,32 m de diamètre intérieur :
  - charge maximum avant flambage : 320 t
  - diminution de section utile : 1,4 %

2. Meegevende cirkelvormige ring met een inwendige doormeter van 4,32 m :
  - maximum belasting vóór knik : 317 t
  - vermindering van de nuttige doorsnede : 12 %
  - de elasticiteitsgrens van het staal werd bereikt aan 122 t.
3. Meegevende elliptische ring met 4,29 m als kleinste en 4,78 m als grootste inwendige doormeter :
  - maximum belasting : 392 t
  - vermindering van de nuttige doorsnede : 9,4 %
  - de elasticiteitsgrens van het staal werd bereikt aan 244 t.

In het geval van de meegevende ramen is de weerstand hoger bij de elliptische dan bij de cirkelvorm, wanneer de belasting wordt toegepast op een vierde van de omtrek en gericht is volgens de grote doormeter van de ellips.

De starre cirkelvormige ramen schijnen een enigzins betere weerstand te hebben dan de cirkelvormige meegevende, zowel voor wat betreft de belasting op het ogenblik dat de knik optreedt, als voor wat de spanningen in het staal aangaat.

#### INHALTSANGABE

Um Kenntnis über die Beanspruchungen zu gewinnen, welchen geschlossene metallische Ausbaurahmen widerstehen können, wurden laboratoriums-mässige Versuche an kreisförmigen und elliptischen, starren oder nachgiebigen Streckenbogen vorgenommen.

Diese Versuche bestanden darin radiale Belastungen auf ein Viertel des äusseren Bogenumfangs auszuüben, wobei die Lastaufnahmen bis zur Knickgrenze des Ringes gesteigert wurden. Die dabei im Stahl auftretenden Spannungen unterlagen der Messung durch Schub- und Druckanzeige.

Es wurden jeweils Ringe aus zwei Bogen im Abstände von etwa 33 cm der Achsen abgedrückt.

An zwei verschiedenen Bogenprofilen ergaben sich die folgenden Versuchsergebnisse :

#### A. Bogen der Firma Rhestahl-Wanheim (Profil 29,5 kg/m)

1. Kreisförmiger starrer Ring von 4,32 m Innendurchmesser :
  - Höchstlast vor Einknicken : 298 t
  - Abnahme des Nutzquerschnitts : 0 %

— la limite élastique de l'acier a été atteinte à 138 t.

#### 2. Anneau circulaire coulissant de 4,32 m de diamètre intérieur :

- charge maximum avant flambage : 317 t
- diminution de section utile : 12 %
- la limite élastique de l'acier a été atteinte à 122 t.

#### 3. Anneau elliptique coulissant dont les axes intérieurs mesurent 4,29 m et 4,78 m :

- charge maximum : 392 t
- diminution de section utile : 9,4 %
- la limite élastique de l'acier a été atteinte à 244 t.

Dans le cas des cadres coulissants, la forme elliptique offre une meilleure résistance que la forme circulaire, quand les charges sont appliquées sur un quart de la circonférence et orientées suivant le grand axe de l'ellipse.

Les cadres circulaires rigides paraissent un peu plus résistants que les cadres circulaires coulissants tant au point de vue de la charge à laquelle apparaît le flambage qu'au point de vue des contraintes développées dans l'acier.

#### SUMMARY

In order to find out what stresses closed metal arches can resist, laboratory tests were carried out on circular and elliptical arches of the rigid or sliding type.

These tests consisted of exerting radial stresses on a quarter of the outer circumference of the arches. The stresses were increased until the ring buckled. The stresses developed in the steel were measured by stress gauges.

The tests were carried out each time on cylinder consisting of two arches placed at about 33 cms from one axis to the other.

The results of the tests carried out on two different arch profiles are as follows :

#### A. Arches of the Rhestahl-Wanheim firm (profile 29.5 kg/m)

1. Rigid circular ring with an inner diameter of 4.32 m :
  - maximum load before buckling : 298 t
  - reduction of the serviceable section : 0 %
  - the elastic limit of the steel was not reached with any gauge.

— Die Elastizitätsgrenze des Stahls wurde an keinem Schub- und Druckmesser erreicht.

2. Doppelter starrer und gleitender Ring :
  - Höchstlast vor Einknicken : 280 t
  - Abnahme des Nutzquerschnitts : 4,6 %
  - Die Elastizitätsgrenze des Stahls wurde bei 120 t erreicht.

#### B. Bogen der Firma Heintzmann (Profil 36 kg/m)

1. Kreisförmiger starrer Ring von 4,32 m Innendurchmesser :
  - Höchstlast vor Einknicken : 320 t
  - Abnahme des Nutzquerschnitts : 1,4 %
  - Die Elastizitätsgrenze des Stahls wurde bei 138 t erreicht.
2. Kreisförmiger gleitender Ring von 4,32 m Innendurchmesser :
  - Höchstlast vor Einknicken : 317 t
  - Abnahme des Nutzquerschnitts : 12 %
  - Die Elastizitätsgrenze des Stahls wurde bei 122 t erreicht.
3. Elliptischer gleitender Ring mit inneren Achsen von 4,29 m (kurz) und 4,78 m (lang) :
  - Höchstlast : 392 t
  - Abnahme des Nutzquerschnitts : 9,4 %
  - Die Elastizitätsgrenze des Stahls wurde bei 244 t erreicht.

Bei Gleitbogen eröffnet die elliptische Form einen besseren Widerstand als die Kreisform, wenn die Lasten auf ein Viertel des Umfanges gelegt und in Richtung der langen Achse der Ellipse orientiert werden.

Starre kreisförmige Bogen scheinen etwas widerstandsfähiger als nachgiebige kreisförmige Bogen zu sein, und zwar sowohl in der Höchstaufnahme bis zur Knicklast als auch in den im Stahl auftretenden Spannungen.

#### 2. Double rigid sliding ring :

- maximum load before buckling : 280 t
- reduction of the serviceable section : 4.6 %
- the elastic limit of the steel was reached at 120 t.

#### B. Arches of the Heintzmann firm (profile 36 kg/m)

1. Rigid circular ring with an inner diameter of 4.32 m :
  - maximum load before buckling : 320 t
  - reduction of the serviceable section : 1.4 %
  - the elastic limit of the steel was reached at 138 t.
2. Sliding circular ring with an inner diameter of 4.32 m :
  - maximum load before buckling : 317 t
  - reduction of the serviceable section : 12 %
  - the elastic limit of the steel was reached at 122 t.
3. Elliptical sliding ring the inner axes of which measure 4.29 and 4.78 m :
  - maximum load : 392 t
  - reduction of the serviceable section : 9.4 %
  - the elastic limit of the steel was reached at 244 t.

In the case of sliding arches, the elliptical form affords better resistance than the circular form, when the loads are applied on a quarter of the circumference and directed along the large axis of the ellipse.

The rigid circular arches seem to be slightly more resistant than the sliding circular type both from the point of view of the load at which buckling occurs and from the point of view of the stresses developed in the steel.

### PLAN DES TITRES

#### Introduction.

Lieu des essais.

Mode de sollicitation de l'anneau métallique.

#### A. CADRES METALLIQUES RHEINSTAHL- WANHEIM

1. Description des cadres métalliques.
  11. Cadres rigides
  12. Double revêtement : cadres rigides et cadres coulissants
  13. Caractéristiques du profil
2. Caractéristiques des anneaux soumis aux essais.
3. Essai sur l'anneau simple rigide.
  31. Déformation de l'anneau rigide

#### 32. Flambage des cadres

33. Variations des tensions dans l'acier des cadres.

34. Charges reprises par les vérins-dynamomètres

#### 4. Essai sur le double revêtement.

41. Déformation des anneaux rigides et coulissants

411. Déformation de l'anneau rigide

412. Déformation de l'anneau coulissant

4121. Aplatissement des madriers séparant les cadres rigides et coulissants.

4122. Variation de diamètre du cadre coulissant

4123. Coulissement des éléments des cadres extérieurs
42. Flambage des cadres
43. Variations des tensions dans l'acier des cadres
44. Charges reprises par les vérins-dynamomètres
- B. CADRES METALLIQUES TOUSSAINT-HEINTZMANN**
1. *Description des cadres métalliques.*
11. Cadres circulaires rigides
12. Cadres circulaires coulissants
13. Cadres elliptiques coulissants
14. Caractéristiques du profil
2. *Caractéristiques des anneaux soumis aux essais.*
3. *Essai sur l'anneau circulaire rigide (essai 1).*
31. Première mise en charge (essai 1<sub>I</sub>)
311. Déformation de l'anneau rigide
312. Flambage des cadres
313. Soulèvement des cadres
314. Variation des rayons de courbure
315. Variation des tensions dans l'acier des cadres
316. Charges reprises par les vérins-dynamomètres
32. Seconde mise en charge (essai 1<sub>II</sub>)
321. Déformation de l'anneau rigide
322. Flambage des cadres
323. Soulèvement des cadres
324. Variation des rayons de courbure
325. Déformation du profil des cadres
326. Variation des tensions dans l'acier des cadres
327. Charges reprises par les vérins-dynamomètres
4. *Essai sur l'anneau circulaire coulissant (essai 2).*
41. Déformation de l'anneau circulaire coulissant
42. Flambage des cadres
43. Variation des rayons de courbure
44. Coulissement des éléments de cadres
45. Variations des tensions dans l'acier des cadres
46. Charges reprises par les vérins-dynamomètres
5. *Essai sur l'anneau elliptique coulissant (essai 3).*
51. Déformation de l'anneau elliptique coulissant
52. Flambage des cadres
53. Variation des rayons de courbure
54. Coulissement des éléments de cadres
55. Comportement des carcans
56. Variations des tensions dans l'acier des cadres
57. Charges reprises par les vérins-dynamomètres
- C. COMPARAISON ENTRE LES DIVERS RESULTATS DES ESSAIS**
1. *Comparaison entre les deux essais de cadres Rheinstahl-Wanheim.*
11. Charges maxima
12. Déformation des anneaux
13. Tensions dans l'acier des cadres
2. *Comparaison entre les divers essais de cadres Toussaint-Heintzmann.*
21. Charges maxima
22. Coulissement des cadres
23. Tensions dans l'acier des cadres
3. *Comparaison entre les essais sur profils I et en forme de gouttière.*
- CONCLUSION.**

### INTRODUCTION

Afin d'avoir une idée plus précise des sollicitations auxquelles des cadres métalliques peuvent résister et de la répartition éventuelle des efforts de poussée autour des galeries, il a paru intéressant à Inichar de faire des essais en laboratoire sur des cadres circulaires et elliptiques dont les dimensions sont égales à celles des galeries et voies de chantier du bassin de Campine.

Afin de pouvoir comparer les résultats de ces essais avec ceux déjà réalisés sur des revêtements cir-

culaires en claveaux de béton, les essais ont été effectués dans les mêmes conditions sur des anneaux de dimensions comparables.

Les essais ont consisté à exercer des efforts radiaux sur une partie de la circonférence extérieure des cadres, le reste de l'anneau étant maintenu par des appuis. Les efforts ont été augmentés progressivement jusqu'au flambage de l'anneau. Les tensions développées dans les cadres métalliques ont été mesurées à l'aide de jauges de contraintes.

Les essais ont été effectués sur les types de soutènement suivants :

- A. Cadres de la firme Rheinstahl-Wanheim  
(Profil : 29,5 kg/m) :
1. Anneau circulaire rigide de 4,32 m de diamètre intérieur
  2. Double anneau rigide et coulissant de 4,30 et de 4,86 m de diamètre intérieur.
- B. Cadres de la firme Heintzmann  
(Profil : 36 kg/m) :
1. Anneau circulaire rigide de 4,32 m de diamètre intérieur
  2. Anneau circulaire coulissant de 4,32 m de diamètre intérieur
  3. Anneau elliptique coulissant dont les axes intérieurs mesurent 4,29 m et 4,78 m.

### LIEU DES ESSAIS

Les essais ont été effectués aux laboratoires de l'Association des Industriels de Belgique (A.I.B.) qui, seule, possède des installations suffisantes pour effectuer des essais sur des anneaux métalliques de 4 à 5 m de diamètre intérieur.

En effet, la G.I.M.E.D. (abréviation de Grand Installation Mécanique pour Essais de Durée) a été conçue pour éprouver, à la fatigue ou aux sollicitations statiques ordinaires, des pièces de grandes dimensions par la mise en œuvre de l'équipement nécessaire pour édifier, autour de l'assemblage à essayer, un montage approprié, composé d'éléments normalisés pour l'application des efforts.

La base de l'installation est constituée par une dalle en béton fortement armé, pourvue d'un système de points d'ancrage encastrés auxquels les bâtis d'essai, les chevalets-équerres et les autres éléments de l'installation peuvent être fixés (fig. 1). L'équipement auxiliaire permet d'appliquer les efforts en un point quelconque de la pièce à essayer et suivant une direction quelconque.

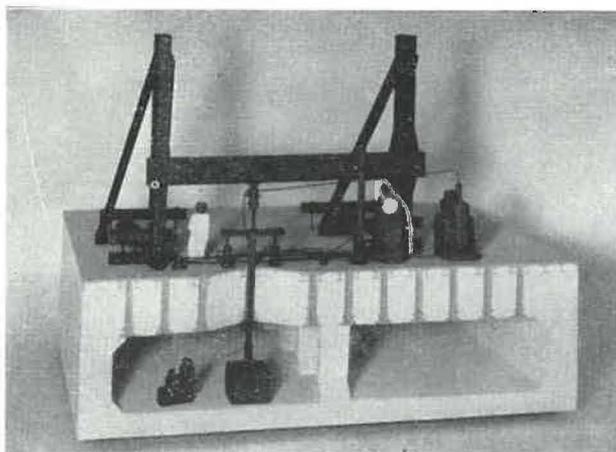


Fig. 1. — Coupe verticale à travers la dalle d'essai de la Gimed.

On peut réaliser les montages pour obtenir, soit des tractions ou des compressions simples, soit des moments de flexion ou de torsion.

### MODE DE SOLLICITATION DE L'ANNEAU METALLIQUE

Afin de pouvoir comparer les résultats des essais de mise en charge sur ces anneaux métalliques avec ceux effectués précédemment sur des anneaux en claveaux de béton, nous avons adopté le montage III décrit dans le Bulletin Technique « Mines » Inichar n° 74 (1) et qui donnait les sollicitations les plus sévères.

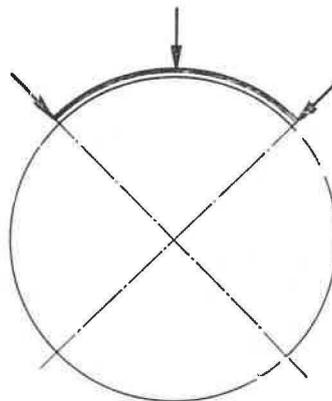


Fig. 2. — Mode de sollicitation adopté pour la mise en charge des anneaux métalliques.

La figure 2 schématise ce montage ; les efforts de poussée sont répartis sur un quart seulement du périmètre extérieur.

La poussée est exercée au moyen de 2 vérins Hydrovis de 300 t chacun ; ces vérins prennent ap-

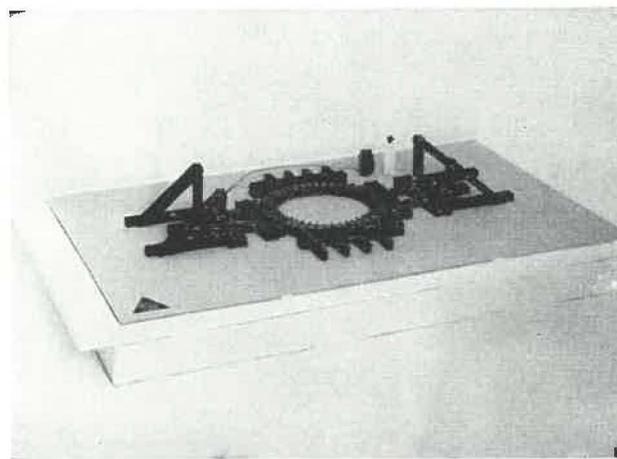


Fig. 3. — Disposition de principe des chevalets et des poutres d'appui lors de la mise en charge d'un anneau (dans le cas de la figure l'essai est effectué sur un anneau en claveaux de béton).

(1) Voir Bulletin Technique « Mines » Inichar n° 74, pages 1546 à 1553, ou la revue en langue allemande « Beton » (Düsseldorf) n° 2-1961, pages 114 à 119.

pui sur des poutres et des chevalets ancrés dans la dalle d'essais (fig. 3 et 4).

Deux vérins Hydrovis de 150 t chacun ont été intercalés entre les poutres d'appui et les chevalets du quart opposé à celui de la mise en charge pour

mesurer la réaction absorbée par ce quart de circonférence (fig. 4).

Les appuis sur les deux autres quarts de la circonférence sont constitués par des poutres qui peuvent glisser latéralement sur des rouleaux métalliques.

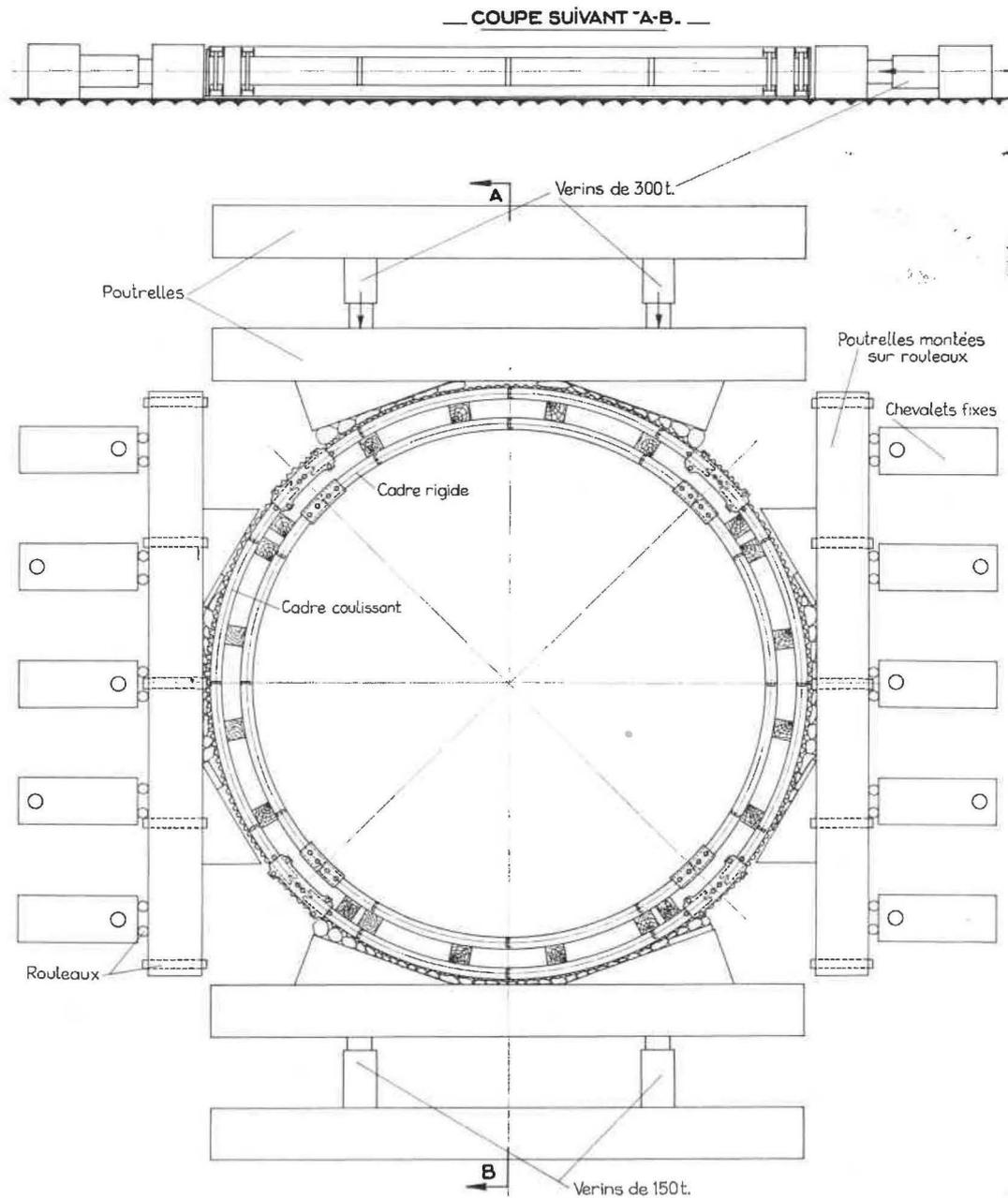


Fig. 4. — Disposition réelle des vérins et des poutres d'appui lors de la mise en charge d'un anneau au moyen de 2 vérins de 300 t; deux vérins de 150 t permettent de mesurer la réaction absorbée par le quart opposé à celui de la mise en charge (dans le cas de la figure, l'essai est effectué sur un double revêtement — rigide et coulissant — de la firme Rheinstahl de Gladbeck).

**A. — CADRES METALLIQUES RHEINSTAHL-WANHEIM**

**1. DESCRIPTION  
DES CADRES METALLIQUES**

La firme Rheinstahl a proposé aux essais les deux types de soutènement suivants :

1. Anneau métallique rigide.
2. Double revêtement formé par l'anneau rigide enveloppé par un autre anneau constitué d'éléments coulissants (fig. 4).

Le profil commun à tous les cadres essayés est constitué d'un I 120 pesant 29,5 kg/m.

**11. Cadres rigides.**

Les cadres circulaires rigides soumis aux essais ont un diamètre intérieur de 4,32 m. Ils sont constitués de 4 éléments en profil I, cintrés, assemblés par éclisses. Un élément a une longueur de 3,46 m et pèse 102 kg.

Les 4 éléments sont placés jointivement et assemblés par des éclisses en 2 pièces avec 4 boulons comme le montrent les figures 4 et 5. La résistance à la traction offerte par ces assemblages est de 8 t.

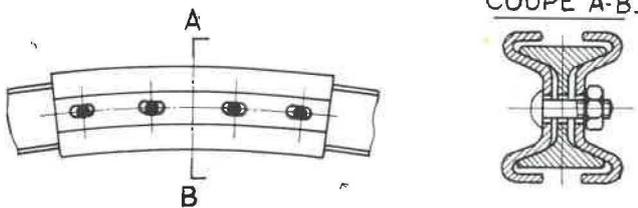


Fig. 5. — Eclisse en 2 pièces avec 4 boulons assemblant deux éléments d'un cadre rigide.

Les cadres ont été disposés pour que la charge, appliquée sur le quart de la circonférence, soit entièrement exercée sur un élément entier de cadre.

Un cadre rigide complet de ce type coûte 3.900 FB.

**12. Double revêtement :  
cadres rigides et cadres coulissants.**

Le double revêtement est constitué d'un cadre rigide identique à celui qui vient d'être décrit, enveloppé d'un cadre coulissant (fig. 4). Le cadre coulissant a un diamètre intérieur de 4,86 m. Il est aussi constitué de 4 éléments en profil I, cintrés, assemblés par des éclisses à coulissement limité, comme le montre la figure 6. Un élément mesure 3,76 m et pèse 112 kg ; une paire d'éclisses pèse 28 kg. Ce

type d'éclisse permet un coulissement de 200 ou 400 mm ; mais pour l'essai effectué au laboratoire, ce coulissement a été limité à 150 mm.

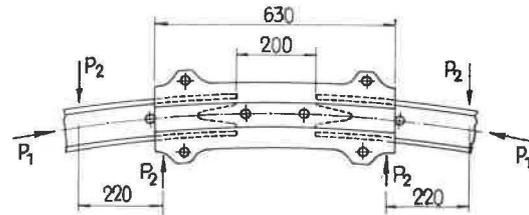


Fig. 6. — Eclisse en 2 pièces à coulissement limité à 200 mm assemblant deux éléments d'un cadre coulissant.

La résistance au coulissement offerte par les éclisses varie entre 5 et 6 t d'après les constructeurs. Les écrous des boulons ont été serrés au moyen d'une clé dynamométrique réglée pour réaliser un effort de 22 kgm.

Comme le montrent les figures 4 et 9, le cadre intérieur rigide est séparé du cadre extérieur coulissant par des madriers en sapin de 160 × 160 mm de section.

Tous les cadres ont été disposés pour que la charge soit entièrement exercée sur un élément entier du cadre extérieur (fig. 4).

Un cadre coulissant de ce type coûte 5.400 FB. Le revêtement double coûte donc 3.900 + 5.400 = 9.300 FB.

**13. Caractéristiques du profil.**

Le profil GI 120 (fig. 7), utilisé pour la construction des cadres, a les caractéristiques suivantes :

- hauteur : 120 mm
- largeur de la semelle : 92 mm

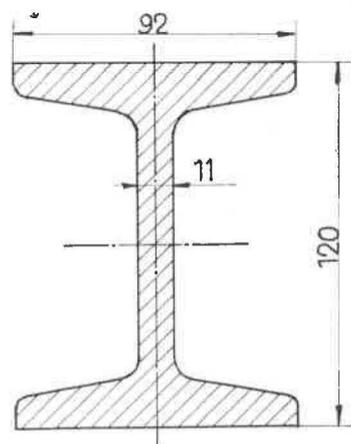


Fig. 7. — Profil des cadres soumis aux essais.

- épaisseur de l'âme : 11 mm
- section : 37,6 cm<sup>2</sup>
- poids au mètre : 29,5 kg/m
- moment de résistance :  $W_x : 136 \text{ cm}^3$   
 $W_y : 32,6 \text{ cm}^3$ .

Les profils ont été chauffés à environ 900°C, trempés à l'eau pendant le cintrage et soumis à un revenu à 575° pour augmenter la résistance de l'acier.

La limite d'élasticité est de 58 kg/mm<sup>2</sup>. La résistance à la rupture est de 80 kg/mm<sup>2</sup>.

## 2. CARACTERISTIQUES DES ANNEAUX SOUMIS AUX ESSAIS

Pour des raisons de stabilité, les essais ont été effectués sur deux cadres rigides et sur deux cadres doubles. La distance d'axe en axe entre cadres a été fixée à 33 cm. Les efforts exercés par les vérins correspondent donc à ceux qui seraient appliqués en pratique sur une longueur de voie de 0,66 m, dans le cas d'une densité de soutènement de 3 cadres par mètre.

Les deux cadres métalliques d'un anneau sont assemblés entre eux par des entretoises Gerlach (fig. 8) faisant fonction de tirants et de poussards à la fois.

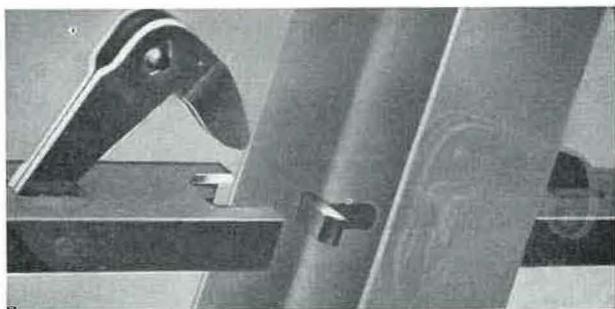


Fig. 8. — Entretoise Gerlach utilisée pour assembler 2 cadres consécutifs.

Cette entretoise est constituée par une poutrelle de profil U 50 et est fixée à l'âme des cadres métalliques à l'aide d'un double crochet qui saisit un tenon à tête de marteau chassé dans l'âme du cadre. Une telle entretoise peut résister à 3 t à la traction et à 9 t à la compression quand la distance entre les cadres est portée à 0,80 m. Ce système de liaison entre cadres ne nécessite aucun boulon.

Pour les essais, on a placé 3 entretoises par élément de cadre. Pour mieux répartir les efforts exercés, un garnissage métallique continu a été placé à l'extrados de l'anneau simple dans le premier essai et à l'extrados de l'anneau extérieur dans le second

essai. Ce garnissage est constitué de tôles ondulées terminées à leur extrémité supérieure par des crochets accrochés à la semelle du cadre supérieur.

Afin d'empêcher tout frottement du ou des cadres inférieurs sur les plaques métalliques constituant le plancher d'essai de la Gimed, des poutrelles de profil U 50 ont été interposées entre le ou les cadres inférieurs et le plancher, ainsi qu'on peut le voir sur les figures 9, 10, 13...

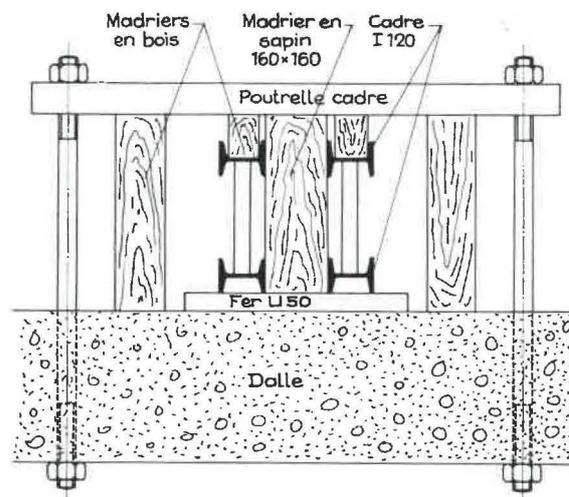


Fig. 9. — Assemblage utilisé pour empêcher le flambage des cadres vers le haut; pour empêcher tout frottement des cadres inférieurs sur les plaques métalliques de la dalle d'essai, des poutrelles de profil U 50 ont été placées sous les cadres inférieurs. On remarque sur la figure que dans le cas du double revêtement les cadres intérieurs rigides sont séparés des cadres extérieurs coulissants par des madriers en sapin de 160 × 160 mm de section et que les cadres supérieurs sont reliés aux cadres inférieurs au moyen d'entretoises Gerlach.

Les vérins utilisés pour appliquer les efforts sur les cadres ont des têtes plates. Leur position a été réglée pour que leur axe soit situé dans le plan horizontal passant à mi-distance entre les 2 cadres (voir coupe en haut de la figure 4).

Pour empêcher tout flambage éventuel des cadres vers le haut, ceux-ci ont été bridés à leur partie supérieure par 4 fortes traverses métalliques disposées comme indiqué sur les figures 9, 10, 13...

## 3. ESSAI SUR L'ANNEAU SIMPLE RIGIDE

La figure 10 montre l'installation du matériel lors du premier essai effectué sur un anneau simple constitué de 2 cadres rigides.

Le diamètre intérieur de l'anneau est de 4,32 m et le diamètre extérieur de 4,56 m. Les 2 cadres sont solidarisés entre eux par 12 entretoises.

La charge maximum exercée sur l'anneau avant flambage fut de 298 t.

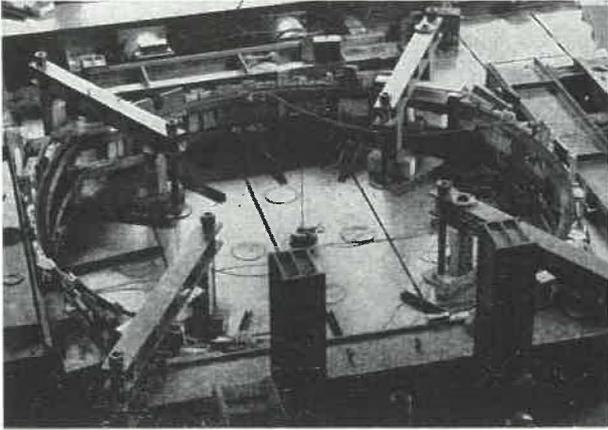


Fig. 10. — Installation du matériel lors du premier essai effectué sur un cadre rigide; on remarque les poutrelles de profil U placées sous le cadre inférieur pour empêcher tout frottement sur le plancher d'essai de la Gimed. Cette photo est prise après le flambage de l'anneau à la charge de 298 t.

### 31. Déformation de l'anneau rigide.

La figure 10 montre l'état de l'anneau à la fin de l'essai.

La figure 11 montre la déformation de l'anneau à la charge de 280 t, soit peu avant la charge maximum de 298 t. Le « diamètre » parallèle à la direction des efforts est passé de 4,32 m à 4,21 m, tandis que perpendiculairement à la direction des efforts, la longueur de l'axe est passée de 4,32 m à 4,35 m.

Le tableau I donne les variations des diamètres intérieurs initiaux en fonction de la charge.

Les diamètres 1-9, 2-10 et 8-16 se sont raccourcis au cours de l'essai de 7,5 cm à 11 cm, tandis que les autres diamètres se sont allongés de 2 à 5 cm. On constate que l'allongement maximum a eu lieu suivant la direction 4-12.

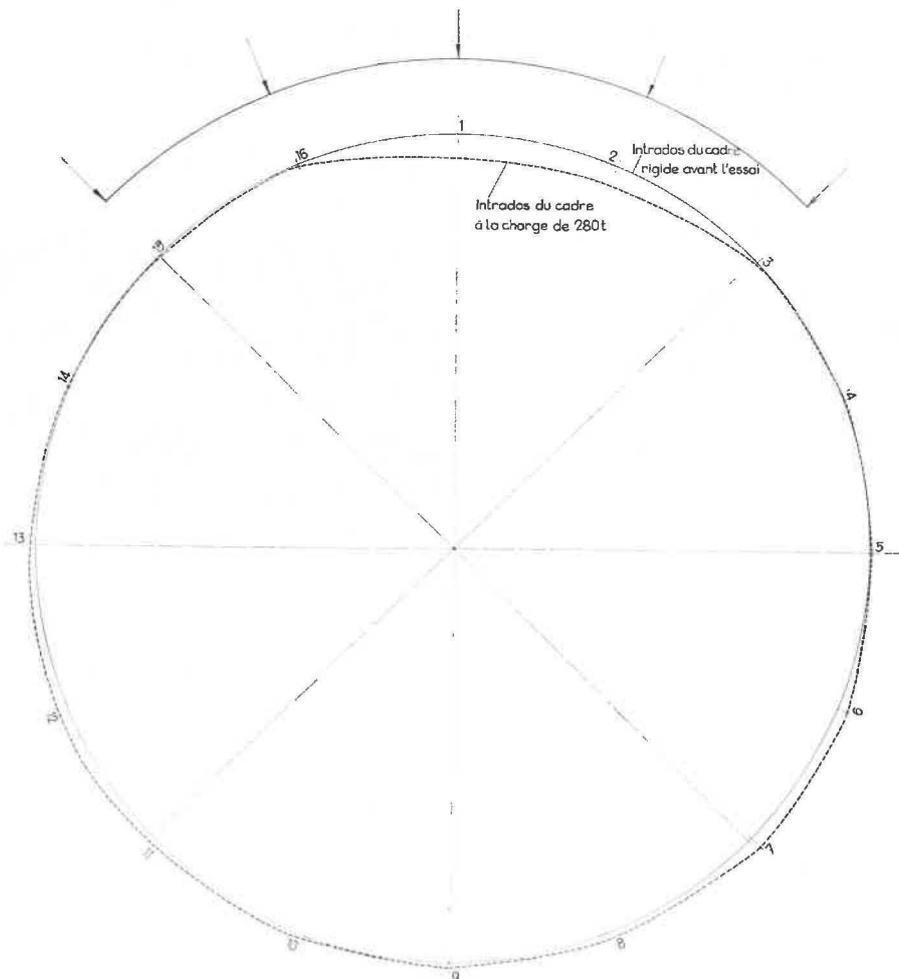


Fig. 11. — Déformation de l'anneau rigide à la charge de 280 t peu avant le flambage; le « diamètre » 1-9 est passé de 4,32 m à 4,21 m et le « diamètre » 5-13 est passé de 4,32 m à 4,35 m.

TABLEAU I.

Variation des « diamètres » de l'anneau rigide en fonction de la charge.

| Charge en t | « Diamètres » en m |       |       |       |       |       |      |       |
|-------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
|             | 1-9                | 2-10  | 3-11  | 4-12  | 5-13  | 6-14  | 7-15 | 8-16  |
| 0           | 4,32               | 4,32  | 4,32  | 4,32  | 4,32  | 4,32  | 4,32 | 4,32  |
| 40          | 4,30               | 4,30  | 4,31  | 4,315 | 4,32  | 4,325 | 4,32 | 4,31  |
| 80          | 4,29               | 4,285 | 4,315 | 4,33  | 4,335 | 4,33  | 4,33 | 4,30  |
| 120         | 4,27               | 4,28  | 4,315 | 4,335 | 4,335 | 4,34  | 4,33 | 4,29  |
| 160         | 4,26               | 4,27  | 4,32  | 4,345 | 4,34  | 4,34  | 4,33 | 4,28  |
| 200         | 4,245              | 4,265 | 4,32  | 4,345 | 4,345 | 4,35  | 4,34 | 4,27  |
| 240         | 4,235              | 4,26  | 4,33  | 4,36  | 4,345 | 4,35  | 4,34 | 4,255 |
| 280         | 4,21               | 4,245 | 4,34  | 4,37  | 4,35  | 4,36  | 4,36 | 4,23  |

Ce tableau montre que les variations de l'anneau ont eu lieu régulièrement tout au long de la mise en charge, seul le diamètre 7-15 s'est allongé brusquement peu avant la charge de 280 t. C'est d'ailleurs à une extrémité de ce diamètre qu'il y eut flambage d'un élément de l'anneau.

Avant l'essai, la section utile était de 14,52 m<sup>2</sup>. A la charge de 280 t, elle est de 14,51 m<sup>2</sup> et on peut donc dire qu'elle est restée sensiblement égale.

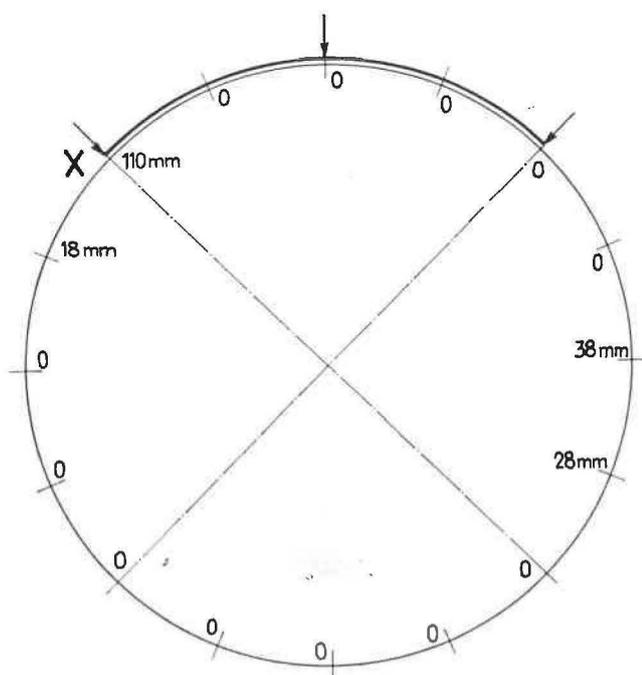


Fig. 12. — La croix indique l'endroit où le flambage s'est produit. Cette figure indique l'importance du soulèvement du cadre inférieur à divers points de son pourtour à la fin de l'essai; le cadre supérieur a subi les mêmes soulèvements et est resté bien parallèle au cadre inférieur tout au long de l'essai.

### 32. Flambage des cadres.

Le flambage de l'anneau rigide s'est produit à la charge de 298 t à l'endroit marqué par une croix sur la figure 12.

La figure 13 montre la façon dont les deux cadres rigides ont flambé. On constate que le flambage a

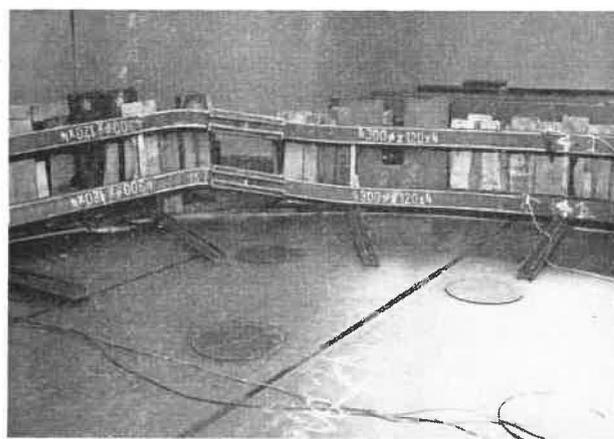


Fig. 13. — Flambage des cadres inférieurs et supérieurs de l'anneau rigide à la charge de 298 t; on constate que les 2 cadres sont restés parallèles.

débuté près d'une éclisse, par flexion vers le haut de deux éléments placés le long des appuis latéraux.

Sur la figure 12, on peut voir les soulèvements du cadre inférieur à divers points de son pourtour. Tout au long des essais, les deux cadres sont restés parallèles l'un à l'autre; il n'y eut aucune rupture du système de liaison entre cadres.

**33. Variations des tensions dans l'acier des cadres.**

Les tensions dans l'acier des éléments des cadres ont été mesurées en 8 points à l'aide de jauges de mesures de contraintes, collées sur une semelle du profil du côté intrados des cadres et placées aux endroits indiqués sur la figure 14. Ces jauges mesurent les tensions dans l'axe longitudinal des cadres.

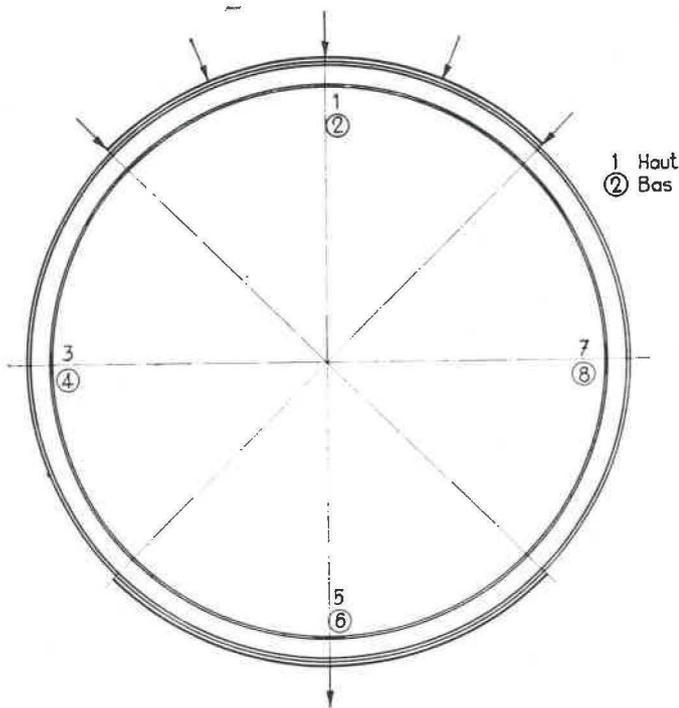


Fig. 14. — Emplacement des 8 jauges de contraintes utilisées pour mesurer les tensions dans l'acier. Ces jauges ont été collées longitudinalement sur une semelle du profil du côté intrados des cadres.

Les graphiques de la figure 15 montrent les variations des contraintes en fonction de la charge appliquée.

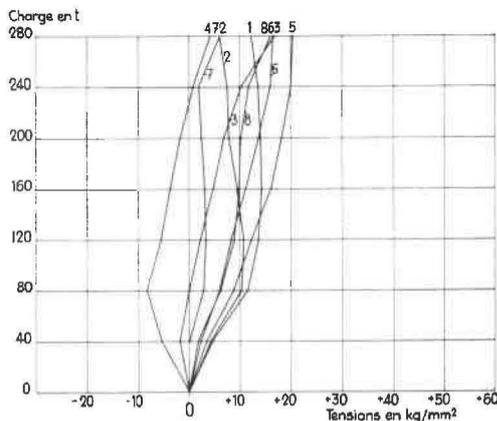


Fig. 15. — Tensions longitudinales dans l'acier des cadres mesurées par les 8 jauges en fonction de la charge appliquée; les tensions positives sont des contraintes de traction.

Les jauges 1 et 2 situées du côté de la charge indiquent les contraintes les plus élevées jusqu'à une charge de 100 t. Une contrainte de 10 kg/mm<sup>2</sup> a été atteinte à 70 et à 75 t pour ces 2 jauges. Les contraintes n'augmentent quasiment plus à partir de la charge de 120 t.

Pour les jauges 5 et 6, opposées à la charge, on constate une augmentation régulière de la tension jusqu'à la charge de 240 t, avec ensuite un ralentissement dans cette augmentation. A la charge de 280 t, ce sont ces jauges qui indiquent les contraintes les plus élevées (15 à 20 kg/mm<sup>2</sup>).

Quant aux jauges 3, 4, 7 et 8, on constate une augmentation rapide des tensions à partir de la charge de 240 t.

**34. Charges reprises par les vérins-dynamomètres.**

Le tableau II donne les réactions reprises par les deux vérins-dynamomètres en fonction de la charge appliquée sur le quart de l'anneau opposé.

TABLEAU II.

| Charge totale exercée en t | Charge reprise par les vérins-dynamomètres en t | Pourcentage de la charge transmise aux vérins-dynamomètres en % | Différence entre les charges transmises et reprises en t |
|----------------------------|---|---|--|
| 40                         | 4   | 10  | 36   |
| 80                         | 40  | 50  | 40   |
| 120                        | 69  | 57,5  | 51   |
| 160                        | 94  | 59  | 66   |
| 200                        | 126   | 63  | 74   |
| 240                        | 138   | 57,5  | 102  |
| 280                        | 172   | 61,5  | 108  |

On constate qu'à partir d'une charge de 120 t, le rapport entre la charge reprise par les 2 vérins-dynamomètres et la charge exercée est voisin de 60 %.

**4. ESSAI SUR LE DOUBLE REVETEMENT**

Les figures 4 et 16 montrent l'installation du matériel lors de l'essai effectué sur le revêtement double constitué de 2 cadres rigides enveloppés de 2 cadres coulissants.

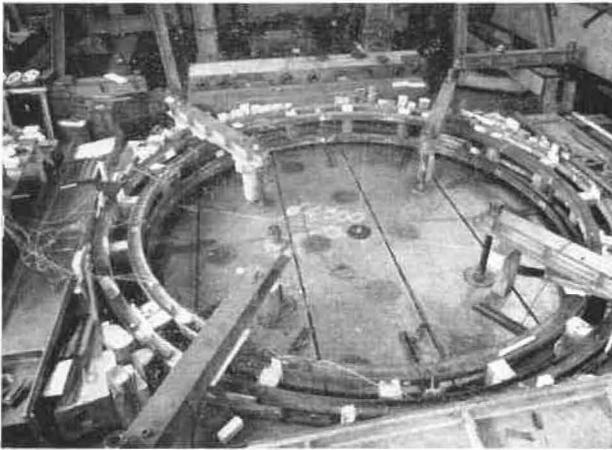


Fig. 16. — Installation du matériel pour l'essai de mise en charge du double revêtement.

Les deux cadres rigides qui forment l'anneau intérieur ont les mêmes dimensions qu'à l'essai précédent et sont aussi solidarisés par 12 entretoises.

Les deux cadres coulissants qui forment l'anneau extérieur ont 4,86 m de diamètre intérieur et 5,10 m de diamètre extérieur au début de l'essai. Le coulisement total permis est de 60 cm, ce qui permettrait de réduire au maximum le diamètre de 4,86 m à 4,67 m. Les deux cadres coulissants sont aussi solidarisés par 12 entretoises.

L'anneau intérieur rigide et l'anneau extérieur coulissant sont séparés par 18 madriers en sapin de  $160 \times 160$  mm de section et 500 mm de hauteur répartis sur le pourtour. La distance entre ces madriers est de 80 cm environ, sauf à l'endroit des éclisses coulissantes où elle est de 1 m.

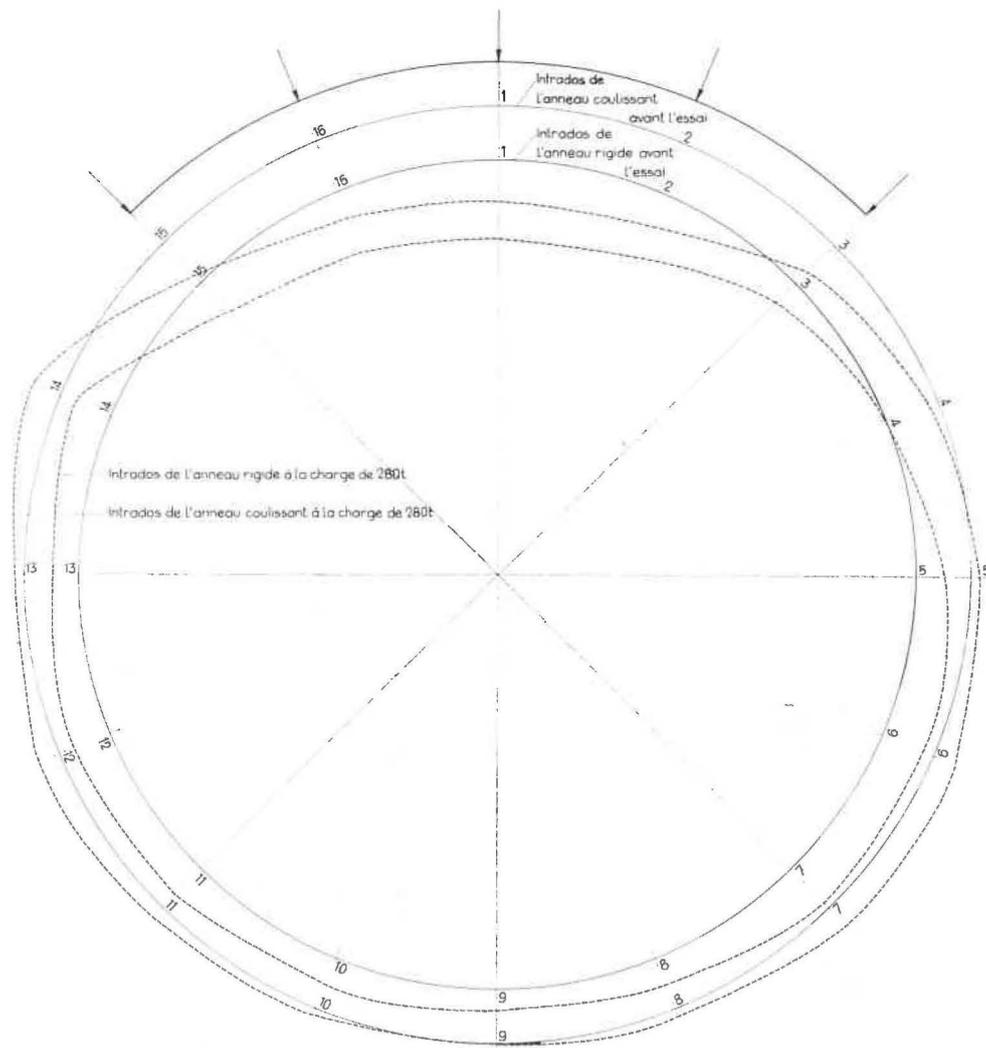


Fig. 17. — Déformation des anneaux rigides et coulissants à la charge de 280 t peu avant le flambage ; le « diamètre » 1-9 est passé de 4,30 m à 3,995 m et le « diamètre » 5-13 de 4,30 m à 4,57 m.

La charge maximum exercée sur le revêtement double avant flambage fut de 280 t.

**41. Déformation des anneaux rigides et coulissants.**

La figure 17 montre la déformation de l'intrados des anneaux rigides et coulissants mesurée juste avant le flambage à la charge de 280 t. Le « diamètre » minimum est passé de 4,30 à 3,995 m à la fin de l'essai.

**411. Déformation de l'anneau rigide.**

Le tableau III donne les variations des diamètres intérieurs des cadres rigides en fonction de la charge.

Le diamètre 1-9 parallèle à la direction des efforts est passé de 4,30 m à 3,995 m, tandis que perpen-

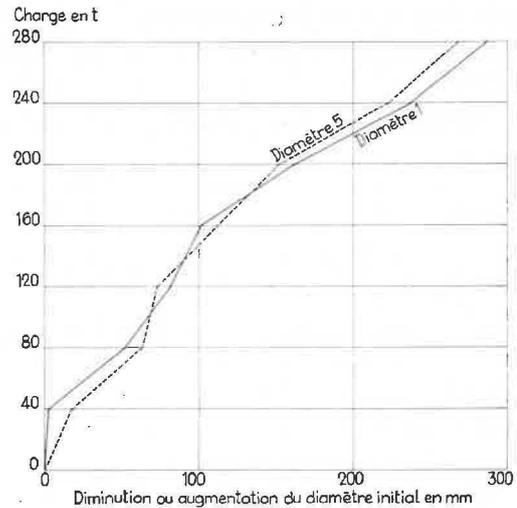


Fig. 18. — Variation des « diamètres » 1-9 et 5-13 de l'anneau rigide en fonction de la charge (diminution du diamètre 1-9 et augmentation du diamètre 5-13).

TABLEAU III.

Variations des « diamètres » de l'anneau rigide en fonction de la charge.

| Charge en t | « Diamètres » en m |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 1-9                | 2-10  | 3-11  | 4-12  | 5-13  | 6-14  | 7-15  | 8-16  |
| 0           | 4,302              | 4,300 | 4,305 | 4,305 | 4,302 | 4,307 | 4,312 | 4,310 |
| 40          | 4,299              | 4,299 | 4,310 | 4,320 | 4,320 | 4,310 | 4,305 | 4,295 |
| 80          | 4,250              | 4,255 | 4,315 | 4,340 | 4,365 | 4,340 | 4,305 | 4,280 |
| 120         | 4,220              | 4,255 | 4,330 | 4,365 | 4,375 | 4,350 | 4,290 | 4,250 |
| 160         | 4,200              | 4,240 | 4,350 | 4,390 | 4,415 | 4,365 | 4,260 | 4,230 |
| 200         | 4,140              | 4,205 | 4,355 | 4,420 | 4,455 | 4,405 | 4,255 | 4,200 |
| 240         | 4,050              | 4,140 | 4,360 | 4,460 | 4,525 | 4,450 | 4,235 | 4,160 |
| 280         | 3,995              | 4,100 | 4,355 | 4,515 | 4,570 | 4,480 | 4,265 | 4,120 |

diculairement à la direction des efforts la longueur de l'axe est passée de 4,30 m à 4,57 m.

Les diamètres 1-9, 2-10, 7-15 et 8-16 se sont raccourcis au cours de l'essai de 5 à 31 cm, tandis que les autres diamètres se sont allongés de 5 à 27 cm.

Les 2 courbes de la figure 18 indiquent les variations des diamètres initiaux 1-9 et 5-13 en fonction de la charge appliquée. On constate une augmentation assez prononcée dans la variation de ces deux axes à partir d'une charge de 200 t. On constate aussi que la diminution du diamètre 1-9 correspond à peu près à l'augmentation du diamètre 5-13.

La surface hachurée de la photographie 19 prise à partir des vérins de poussée montre aussi cette ovalisation des cadres intérieurs à la fin de l'essai.

Avant l'essai, la section utile de l'anneau rigide était de 14,52 m<sup>2</sup>. A la charge de 280 t, cette section

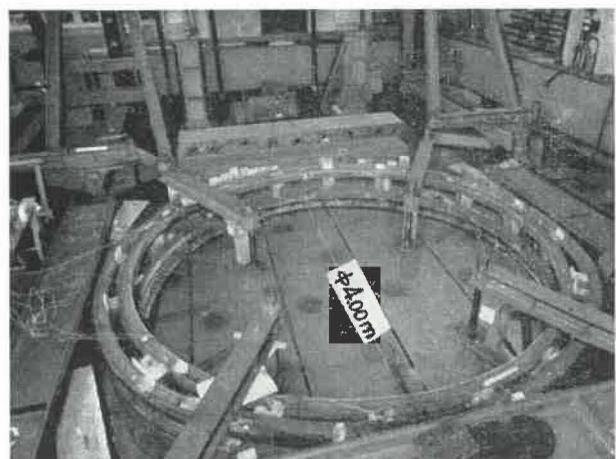


Fig. 19. — La surface hachurée sous le cadre inférieur à l'intérieur de l'anneau met en évidence l'ovalisation des cadres sous l'effet de la charge; la photo est prise à partir des vérins qui exercent la poussée sur l'anneau.

est de 14,92 m<sup>2</sup>, ce qui correspond à une augmentation de 2,7 % par rapport à la section initiale.

#### 412. Déformation de l'anneau coulissant.

##### 4121. Aplatissement des madriers séparant les cadres rigides et coulissants.

Le tableau IV donne la variation de la distance entre les cadres intérieurs rigides et les cadres extérieurs coulissants aux 16 points indiqués sur la figure 20. Cette distance est de 160 mm au départ de l'essai.

A l'exception des points 4 et 14, on constate que l'écrasement des madriers en sapin est à peu près le même partout à la fin de l'essai.

On peut voir sur la figure 21 que les madriers situés près des points de mesures 5 et 6 sont fortement écrasés par les cadres ; on constate même un éclatement des fibres du bois. Il faut signaler ici que, pour obtenir une diminution d'épaisseur par écrasement d'un madrier en sapin de plus de 300 % (comme aux points 10 et 11), il faut exercer un effort de compression très élevé.

##### 4122. Variation de diamètre du cadre coulissant.

La figure 17 montre la déformation de l'intrados de l'anneau coulissant juste avant le flambage à la charge de 280 t.

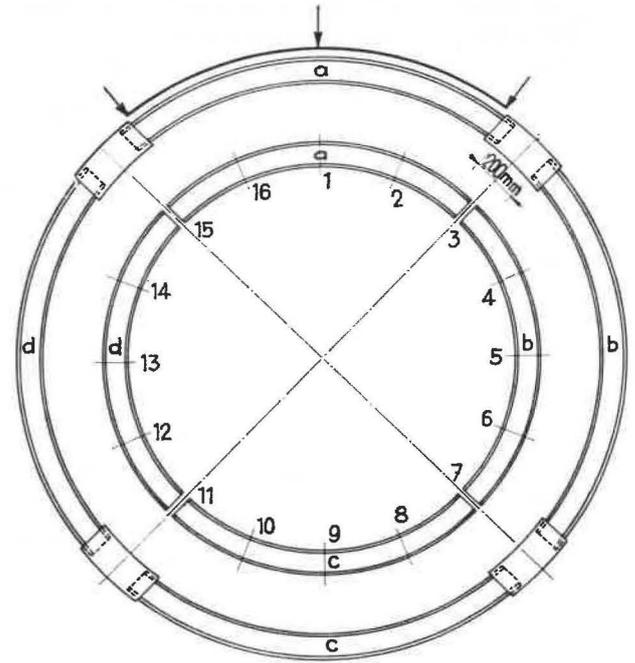


Fig. 20. — Emplacement des 4 éclisses du cadre coulissant par rapport à la direction des efforts qui s'exercent sur le seul élément « a ».

Le « diamètre » parallèle à la direction des efforts est passé de 4,86 m à 4,36 m, tandis que perpendiculairement à la direction des efforts la longueur du diamètre est passée de 4,86 à 4,96 m.

TABLEAU IV.

Variation de la distance entre cadres rigides et coulissants.

| Position<br>des points<br>de mesures | Distance en mm |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                      | Charge en t    |     |     |     |     |     |     |     |
|                                      | 0              | 40  | 80  | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 |
| 1                                    | 160            | 155 | 149 | 135 | 90  | 80  | 75  | 73  |
| 2                                    | 160            | 158 | 150 | 135 | 95  | 82  | 66  | 61  |
| 3                                    | 160            |     |     |     |     |     |     |     |
| 4                                    | 160            |     | 157 | 154 | 148 | 139 | 119 | 110 |
| 5                                    | 160            |     | 155 | 148 | 137 | 115 | 83  | 68  |
| 6                                    | 160            |     | 154 | 147 | 127 | 105 | 80  | 68  |
| 7                                    | 160            |     |     |     |     |     |     |     |
| 8                                    | 160            |     | 149 | 132 | 89  | 74  | 65  | 62  |
| 9                                    | 160            |     | 141 | 123 | 75  | 66  | 65  | 63  |
| 10                                   | 160            |     | 149 | 128 | 81  | 70  | 60  | 49  |
| 11                                   | 160            |     | 152 |     |     |     |     | 48  |
| 12                                   | 160            |     | 155 | 146 | 135 | 120 | 98  | 80  |
| 13                                   | 160            |     | 160 | 151 | 140 | 123 | 94  | 75  |
| 14                                   | 160            |     |     | 156 | 153 | 144 | 130 | 122 |
| 15                                   | 160            |     | 161 |     |     |     |     |     |
| 16                                   | 160            |     | 150 | 138 | 102 | 85  | 72  | 65  |

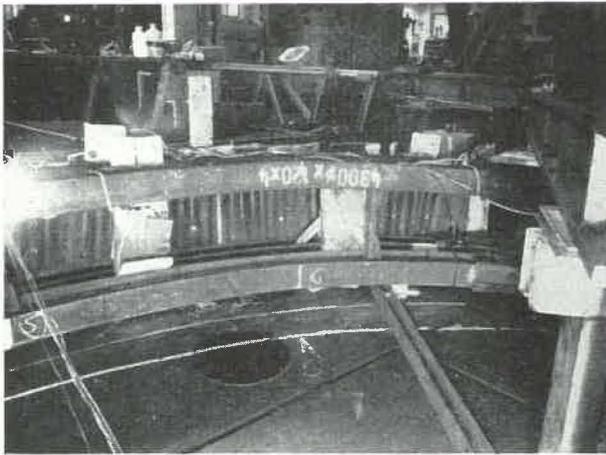


Fig. 21. — Vue rapprochée de la partie de l'anneau qui a flambé ; on constate que les 2 cadres inférieurs et supérieurs sont restés parallèles et que le flambage a affecté l'anneau rigide et l'anneau coulissant.

Les diamètres 1-9, 2-10 et 8-16 se sont raccourcis au cours de l'essai de 39 à 50 cm, tandis que les diamètres 4-12, 5-13 et 6-14 se sont allongés de 5 à 10 cm.

Avant l'essai, la section utile de l'anneau coulissant était de 18,55 m<sup>2</sup>. A la charge de 280 t, cette section est de 17,70 m<sup>2</sup>, ce qui correspond à une diminution de 4,6 % par rapport à la section initiale.

4123. *Coulissement des éléments des cadres extérieurs.*

Le coulissement des éléments des cadres coulissants extérieurs a eu lieu régulièrement tout au long de l'essai ; cependant à la fin de l'essai, nulle part, ces éléments n'étaient encore entrés en contact.

Le tableau V montre la valeur du coulissement en fonction de la charge appliquée pour chacune des 4 éclisses. Ces éclisses sont situées sur le cadre extérieur aux points 3, 7, 11 et 15 de la figure 20. Comme les 4 éléments de cadres, indiqués a, b, c et d sur la figure 20, ne coulisent pas les uns sur les autres mais dans une éclisse, on a indiqué les coulissements de chacun de ces éléments de cadres sur l'éclisse correspondante.

Le coulissement total des 4 éclisses est de 481 mm sur les 600 mm possibles.

On peut constater qu'à la fin de l'essai, le coulissement total à chacune des 4 éclisses est sensiblement le même pour tous et est d'environ 120 mm sur les 150 mm de course possible.

Si l'on mesure par contre le coulissement de chacun des éléments de cadre, on obtient les coulissements suivants :

- Cadre a : 155 mm
- Cadre b : 60 mm
- Cadre c : 177 mm
- Cadre d : 89 mm

On constate donc que les coulissements des éléments de cadres a et c sont beaucoup plus importants que ceux des éléments latéraux b et d.

La résistance au coulissement des éclisses du cadre coulissant était très faible (de l'ordre de 5 à 6 t), ces éclisses n'auraient pu s'opposer au coulissement total si cet effort n'avait pas été contrarié par la résistance à la compression des madriers en bois séparant les cadres coulissants des cadres rigides.

42. *Flambage des cadres.*

Le flambage des 2 anneaux rigides et coulissants s'est produit à la charge de 280 t à proximité du

TABLEAU V.

*Rapprochement des éléments coulissants en fonction de la charge.*

| Eclisses situées aux points | Coulissement de l'élément de cadre | Rapprochement en mm |    |     |     |     |     |     |
|-----------------------------|------------------------------------|---------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                             |                                    | Charge en t         |    |     |     |     |     |     |
|                             |                                    | 0                   | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 |
| 3                           | a                                  | 0                   | 18 | 40  | 83  | 88  | 110 | 110 |
|                             | b                                  | 0                   | 0  | 0   | 5   | 8   | 13  | 16  |
| 7                           | b                                  | 0                   | 0  | 0   | 1   | 10  | 31  | 44  |
|                             | c                                  | 0                   | 2  | 9   | 39  | 61  | 66  | 67  |
| 11                          | c                                  | 0                   | 24 | 52  | 102 | 105 | 110 | 110 |
|                             | d                                  | 0                   | 2  | 2   | 4   | 15  | 31  | 20  |
| 15                          | d                                  | 0                   | 1  | 7   | 22  | 33  | 55  | 69  |
|                             | a                                  | 0                   | 6  | 8   | 8   | 29  | 35  | 45  |

point 6 de la figure 17. Le flambage s'est produit simultanément aux 4 éléments de cadre situés à cet endroit.

La figure 21 montre la façon dont les cadres ont flambé. On constate que le flambage a débuté à 1 m environ d'une éclisse par flexion vers le haut de 4 éléments placés le long des appuis latéraux.

Chacune des figures 22 et 23 met en évidence la déformation permanente d'un élément qui a flambé par comparaison avec un élément neuf.

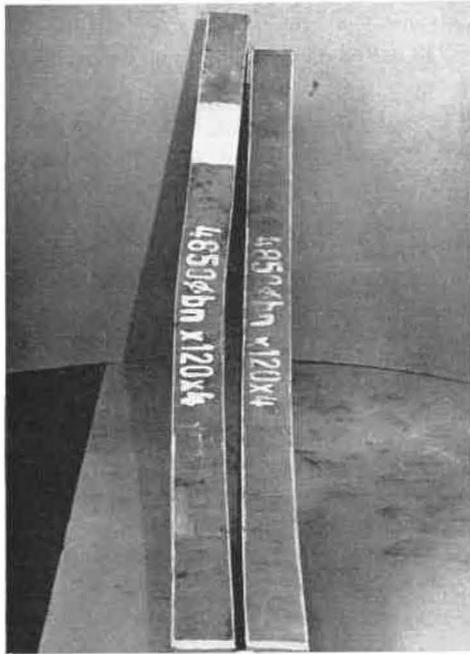


Fig. 22. — Déformation de l'élément du cadre extérieur qui a flambé par rapport à un élément resté intact.

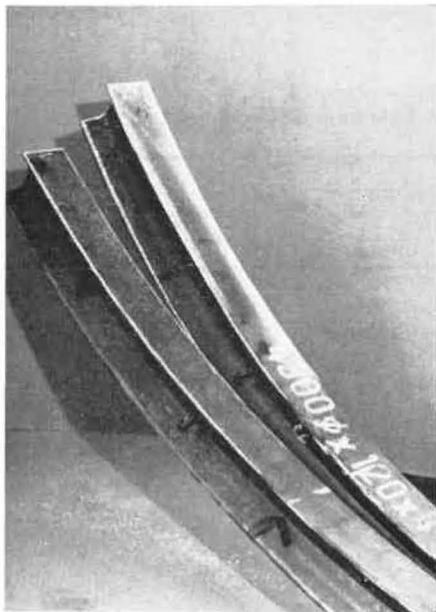


Fig. 23. — Déformation de l'élément du cadre intérieur rigide qui a flambé par rapport à un élément resté intact.

Les deux cadres de l'anneau rigide et les deux cadres de l'anneau coulissant sont restés bien parallèles tout au long de l'essai et même lors du flambage. On constate que les déformations permanentes des 4 éléments de cadres qui ont flambé sont les mêmes.

#### 43. Variations des tensions dans l'acier des cadres.

Les tensions dans l'acier des éléments des cadres ont été mesurées en 16 points à l'aide de jauges de contraintes placées aux endroits indiqués sur la figure 24. Ces jauges collées sur une semelle du profil du côté intrados ou extrados des cadres, mesurent les tensions dans l'axe longitudinal des cadres.

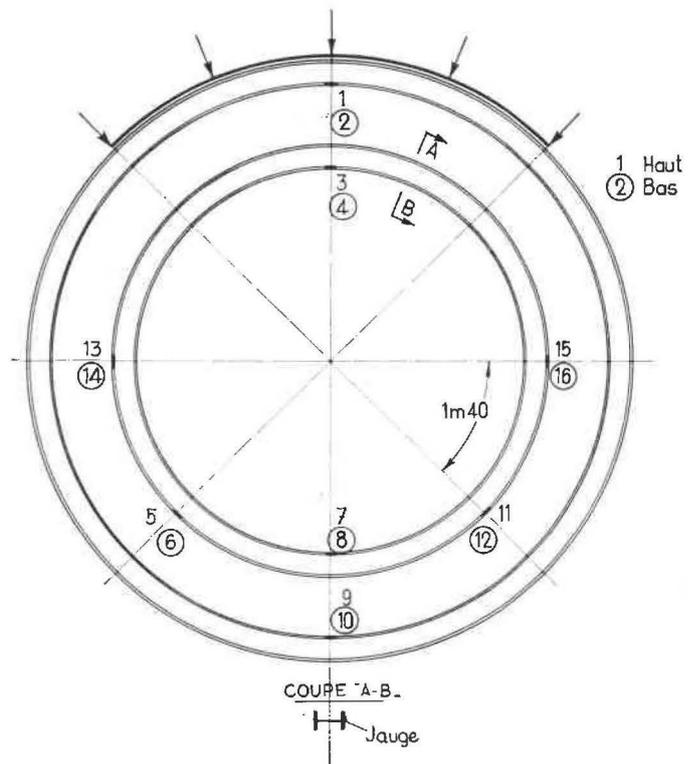


Fig. 24. — Emplacement des 16 jauges de contraintes utilisées pour mesurer les tensions dans l'acier. Ces jauges ont été collées longitudinalement sur une semelle du profil du côté intrados ou extrados des cadres.

Les graphiques des figures 25 et 26 montrent les variations des contraintes en fonction de la charge appliquée.

Les valeurs données par les jauges utilisées ne sont plus exactes dès que la contrainte dépasse  $50 \text{ kg/mm}^2$  (limite d'élasticité de l'acier des cadres :  $58 \text{ kg/mm}^2$ ). Toutes les contraintes mesurées sont des tractions.

Une contrainte de  $10 \text{ kg/mm}^2$  a été atteinte à une charge d'environ 35 t à la jauge 9 et à une

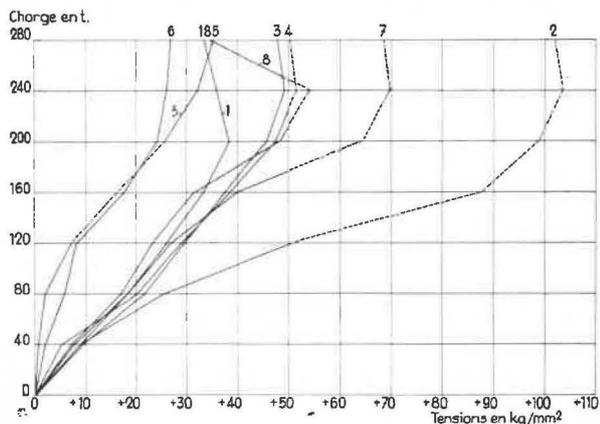


Fig. 25. — Tensions dans l'acier mesurées par les jauges 1 à 8 en fonction de la charge appliquée.

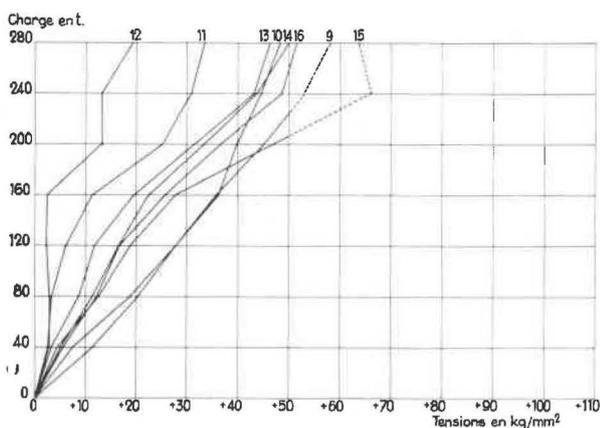


Fig. 26. — Tensions dans l'acier mesurées par les jauges 9 à 18 en fonction de la charge appliquée.

charge de 45 t à la jauge 3. Onze jauges mesurent une contrainte supérieure à 10 kg/mm<sup>2</sup> à une charge de 80 t.

Une contrainte de 20 kg/mm<sup>2</sup> est déjà obtenue à une charge de 66 t environ à la jauge 2. Quatre jauges mesurent une contrainte supérieure à 20 kg/mm<sup>2</sup> à une charge de 80 t.

Une contrainte de 50 kg/mm<sup>2</sup> est atteinte à une charge de 118 t à la jauge 2.

La limite d'élasticité de l'acier est déjà dépassée à une charge de 125 t à la jauge 2. A la fin de l'essai, cette limite d'élasticité est dépassée aux jauges 2, 7 et 15.

Le tableau VI permet de comparer les contraintes de traction développées dans l'acier des divers éléments des cadres au cours de l'essai sur anneau simple rigide et au cours de l'essai sur double revêtement rigide et coulissant.

TABLEAU VI.

Comparaison des contraintes développées dans l'acier des cadres dans le cas de l'anneau simple rigide et dans le cas du double revêtement à une charge de 80 t.

| Emplacement de la jauge   | Charge de 80 t   |  |
|---|--|--|
|   | Contraintes de traction dans l'acier en kg/mm <sup>2</sup> |  |
|   | Anneau simple rigide                                       | Double revêtement rigide et coulissant |
| Elément de cadre situé du côté de la charge<br>( cadre rigide-intrados<br>( cadre coulissant-intrados       | 10,90<br>—   | 21,05<br>21,90                         |
| Elément de cadre situé du côté opposé à la charge<br>( cadre rigide-intrados<br>( cadre coulissant-intrados | 7,40<br>—  | 17,65<br>19,55                         |
| Elément de cadre situé latéralement à la charge<br>( cadre rigide-intrados<br>( cadre rigide-extrados       | 0,20<br>—  | —<br>11,10                             |

On constate que les tensions dans l'acier sont à peu près doubles dans le cas du double revêtement que dans le cas de l'anneau simple rigide.

On remarque aussi que, dans le cas du double revêtement, les tensions développées à l'intrados des cadres rigides et coulissants sont à peu près les mêmes, tout en étant de 5 à 10 % supérieures pour l'anneau coulissant.

**44. Charge reprise par les vérins-dynamomètres.**

Le tableau VII donne les réactions reprises par les deux vérins-dynamomètres en fonction de la charge appliquée sur le quart opposé.

TABLEAU VII.

| Charge totale exercée en t | Charge reprise par les vérins-dynamomètres en t | Pourcentage de charge transmise aux vérins-dynamomètres en % | Différence entre les charges transmises et reprises en t |
|----------------------------|---|--|--|
| 60                         | 30  | 50   | 30   |
| 70                         | 36  | 51,5   | 34   |
| 84                         | 46  | 55   | 38   |
| 120                        | 76  | 63,5   | 44   |
| 160                        | 120   | 75   | 40   |
| 200                        | 140   | 70   | 60   |
| 240                        | 164   | 68,5   | 76   |
| 280                        | 204   | 73,5   | 76   |

On constate qu'à partir d'une charge de 120 t, le rapport entre la charge reprise par les 2 vérins-dynamomètres et la charge exercée est supérieur

à 60 %. On constate que les charges reprises sont légèrement plus grandes que dans l'essai précédent (voir tableau II).

## B. — CADRES METALLIQUES TOUSSAINT-HEINTZMANN

### 1. DESCRIPTION DES CADRES METALLIQUES

Les essais ont été effectués sur les trois types de soutènement suivants de la firme Bochumer Eisenhütte (cadres Toussaint-Heintzmann) :

1. Cadres circulaires rigides
2. Cadres circulaires formés d'éléments coulissants
3. Cadres elliptiques formés d'éléments coulissants.

Le profil commun à tous les cadres essayés a la forme d'une gouttière d'un poids de 36 kg/m.

### 11. Cadres circulaires rigides.

Les cadres circulaires rigides soumis aux essais ont un diamètre intérieur de 4,32 m. Ils sont constitués de 4 éléments cintrés identiques, assemblés par éclisses et carcans. Un élément de cadre a une longueur de 3,52 m et pèse 126 kg.

Les 4 éléments d'un cadre sont placés bout à bout et assemblés par des systèmes à carcans comme on peut en voir sur la figure 27. Un assemblage est constitué par 2 courts éléments cintrés formant écli-

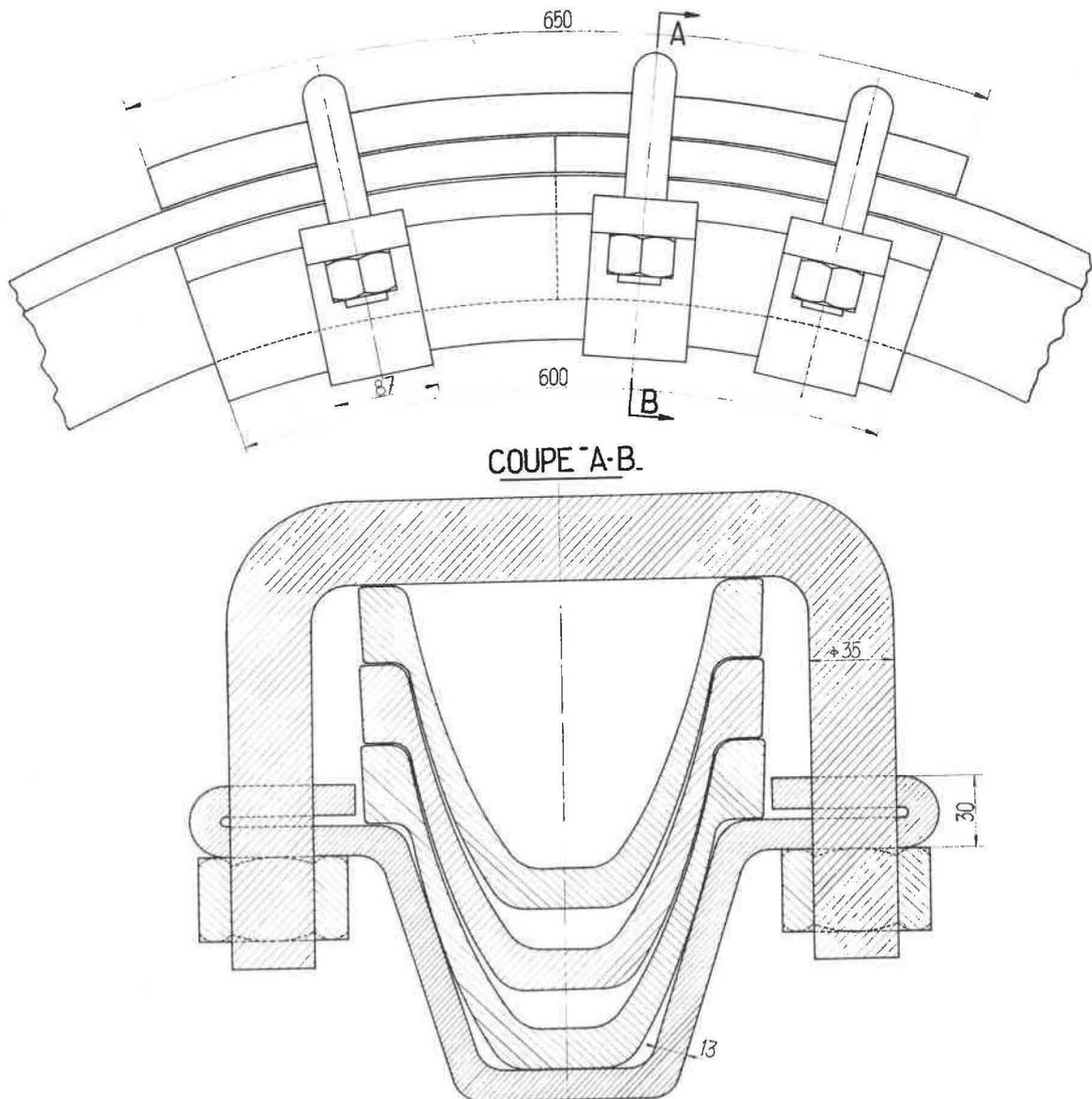


Fig. 27. — Système d'assemblage des éléments d'un cadre circulaire rigide avec coupe transversale ; les éléments sont placés bout à bout et assemblés par 2 courts éléments de cadres au moyen de 3 carcans.

ses, de même profil que le cadre, et qui ensèrent les extrémités jointives de 2 éléments du cadre. L'ensemble est solidarisé par 3 carcans. La longueur de l'élément de cadre placé à l'intrados est de 600 mm et la longueur de celui placé à l'extrados est de 650 mm.

Chacun des 3 carcans est constitué par une clame de 87 mm de largeur et un étrier de 35 mm de diamètre assemblés par 2 écrous (fig. 27).

Un de ces carcans pèse 10,7 kg. Par cadre, il faut placer et serrer 24 boulons de 35 mm de diamètre.

Un assemblage complet pèse 77 kg et le poids total d'un cadre est de 780 kg.

Un cadre rigide complet du type de 36 kg/m et de 4,32 m de diamètre intérieur coûte 745 DM ou 9.330 FB.

## 12. Cadres circulaires formés d'éléments coulissants.

Les cadres circulaires coulissants, soumis aux essais, ont un diamètre intérieur de 4,32 m. Ils sont constitués de 4 éléments cintrés assemblés par carcans de type G 9212 (\*). Un élément a une longueur de 4,02 m et pèse 145 kg.

Les 4 éléments d'un cadre sont assemblés par des ensembles de carcans à coulissement illimité. Ces assemblages sont constitués par 3 carcans formés chacun par deux plats cintrés en forme d'U et assemblés par 1 ou 2 paires de boulons de 20 mm de diamètre. Le chevauchement moyen de deux éléments est de 500 mm.

Comme le montre la figure 28, un assemblage est constitué par 2 carcans à une paire de boulons et 1 carcan à 2 paires de boulons. Il y a donc au total 8 écrous à serrer par assemblage, soit 32 par cadre.

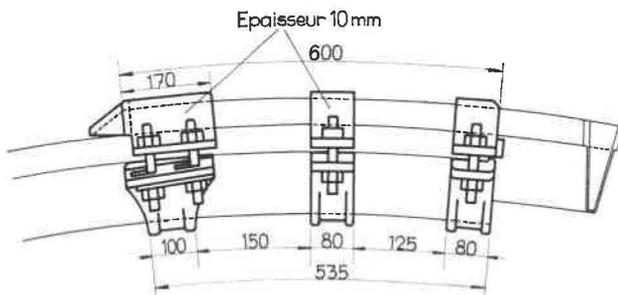


Fig. 28. — Système d'assemblage des éléments d'un cadre circulaire coulissant.

Le carcan à 2 paires de boulons comporte un système à coins qui crée un auto-serrage de l'assemblage (fig. 28). Cet auto-serrage est bien mis en

(\*) Suivant référence des catalogues de la firme Bochumer-Eisenhütte.

évidence par l'essai que nous avons exécuté en laboratoire sur un assemblage à 3 carcans.

Cet essai a été effectué sur deux éléments droits de 1,50 m de longueur, reliés par l'assemblage complet en question. Au début de l'essai, la longueur de recouvrement était de 50 cm (fig. 29).

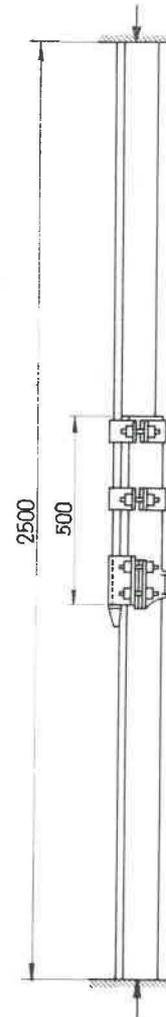


Fig. 29. — Montage utilisé pour les essais de coulissement des assemblages de cadres.

La figure 30 a donné la courbe charge-coulissement obtenue lors d'un essai dans lequel les 8 boulons des 3 carcans ont été serrés avec une clé dynamométrique réglée pour réaliser un effort de 35 kgm. Cette figure montre que l'auto-serrage s'est effectué pendant les 2 premiers centimètres du coulissement. Les éléments coulissent ensuite à une charge plus ou moins constante de 40 t.

La figure 30 b montre la charge nécessaire pour obtenir un coulissement quand le montage du carcan à auto-serrage est exécuté à l'envers. La résistance au coulissement, qui est d'abord de 24 t, tombe rapidement à 15 t. Dans ce cas, ce ne sont plus que les 2 petits carcans qui résistent au coulissement, soit 4 boulons au lieu de 8.

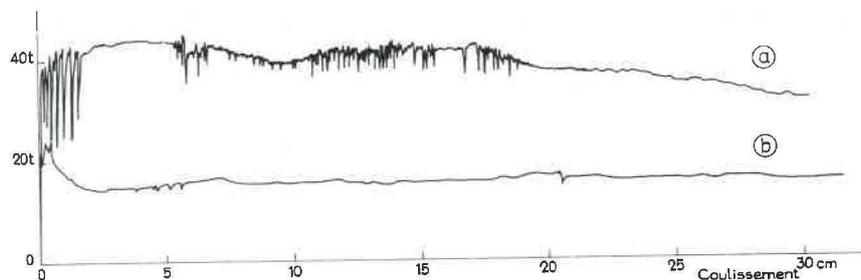


Fig. 30. — Courbes de coulissement d'un assemblage en fonction de la charge dans le cas :

- a) d'un serrage correct des 8 boulons des 3 carcans au moyen d'une clé dynamométrique réglée à 35 kgm ; on constate qu'après autoserrage la charge se maintient à environ 40 t.
- b) d'un montage à l'envers du carcan à autoserrage ; la charge de coulissement tombe à 15 t.

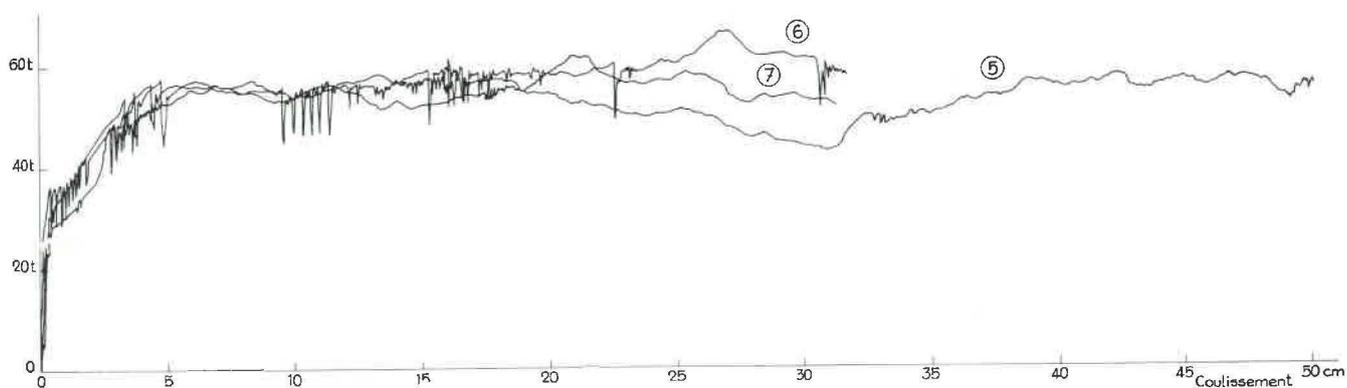


Fig. 31. — Courbes de coulissement d'un assemblage en fonction de la charge dans le cas d'un serrage des 8 boulons au moyen d'une clé dynamométrique réglée à  
35 kgm dans le cas de la courbe 5  
40 kgm dans le cas de la courbe 6  
30 kgm dans le cas de la courbe 7

La figure 31 donne d'autres courbes du coulissement en fonction de la charge quand la clef dynamométrique utilisée pour le serrage des boulons est réglée pour réaliser des efforts de 30, de 35 et de 40 kgm. On constate que la résistance des carcans au coulissement varie peu d'un essai à l'autre et reste en général supérieure à 40 t.

Un carcan simple (de type : G2 et G10) pèse 5,7 kg et un carcan double (type G200) 15,5 kg.

Le poids d'un cadre complet est de 580 kg pour les 4 éléments et de 107,6 kg pour les assemblages, soit 687,6 kg au total.

Un cadre circulaire coulissant complet du type de 36 kg/m et de 4,32 m de diamètre intérieur coûte 669,35 DM ou 8.400 FB.

### 13. Cadres elliptiques formés d'éléments coulissants.

Les cadres elliptiques coulissants, soumis aux essais, ont comme dimension intérieure 4,290 m suivant le grand axe et 3,780 m suivant le petit axe

de l'ellipse. On constate que le périmètre de cette section est environ le même que la circonférence du cadre circulaire coulissant de 4,32 m de diamètre intérieur.

Ils sont constitués de 4 éléments cintrés, assemblés par des ensembles de carcans identiques à ceux des cadres circulaires (fig. 28). Ces éléments sont disposés pour que les 4 assemblages soient situés à 45° des axes principaux.

Le chevauchement moyen de deux éléments voisins est de 560 mm environ, soit 600 mm mesuré à l'extrados et 530 mm mesuré à l'intrados.

Les 4 éléments n'ont donc pas la même longueur. Les deux éléments à petit rayon de courbure ont une longueur de 3,60 m et pèsent chacun 129,5 kg. Les deux éléments à grand rayon de courbure ont une longueur de 4,125 m et pèsent chacun 148,5 kg.

Un cadre complet pèse 664 kg.

Un cadre elliptique coulissant de ce modèle et du type de 36 kg/m coûte 653,60 DM ou 8.150 FB.

**14. Caractéristiques du profil.**

Le profil en forme de gouttière (fig. 32), utilisé pour la construction des cadres, est du type TH « 58 » et a les caractéristiques suivantes :

- Hauteur : 138 mm
- Largeur côté extrados : 169 mm  
côté intrados : 50,5 mm
- Section : 45,8 cm<sup>2</sup>
- Poids au mètre : 36 kg
- Moment d'inertie :  $I_x = 977 \text{ cm}^4$   
 $I_y = 1.270 \text{ cm}^4$
- Moment de résistance :  $W_x = 138 \text{ cm}^3$   
 $W_y = 151 \text{ cm}^3$

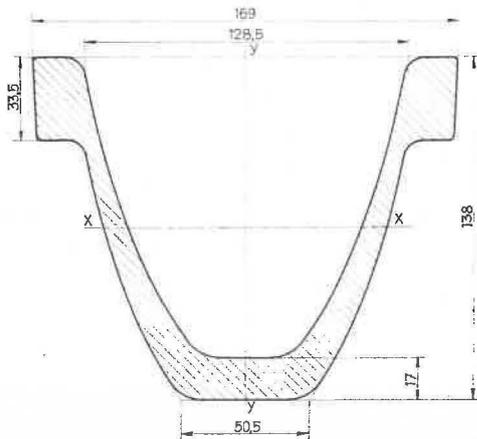


Fig. 32. — Profil de cadre en forme de gouttière du type TH « 58 ».

L'acier des cadres a été traité. Actuellement près de 60 % des cadres métalliques livrés en Allemagne subissent un traitement spécial avant leur livraison, contre 3 % seulement en 1955. Ce traitement spécial a permis d'augmenter de 50 % la limite élastique de l'acier utilisé qui a été lui-même fortement amélioré. On utilise seulement de l'acier à grains fins, affiné par soufflage. Le traitement spécial aug-

mente encore la durée de vie des cadres par une meilleure possibilité de reformation à froid.

La limite d'élasticité est en moyenne de 55 kg/mm<sup>2</sup>. La résistance à la rupture varie entre 68 et 85 kg/mm<sup>2</sup>.

Ce profil TH « 58 » a été mis au point en 1958 pour remplacer le profil TH « 48 ». La figure 33 permet de comparer ces 2 types « 48 » et « 58 ».

Les profils sont tous identiques aussi bien pour les pièces intérieures que les pièces extérieures. Il en est de même pour les cadres habituels en 3 pièces dans lesquels les bèles et les montants sont interchangeables, tandis que pour l'ancien modèle, à 21 kg/m, utilisé encore en Belgique, le profil des bèles n'est pas le même que celui des montants.

**2. CARACTERISTIQUES DES ANNEAUX SOUMIS AUX ESSAIS**

Les essais ont été effectués sur des ensembles de deux cadres. La distance d'axe en axe entre cadres a été fixée à 33,5 cm pour les cadres rigides (essais 1I et 1II) et à 27,5 cm pour les cadres coulissants, circulaires et elliptiques (essais 2 et 3). Les 2 cadres métalliques d'un anneau sont assemblés entre eux par des entretoises faisant à la fois fonction de tirants et de poussards.

Dans le cas de l'anneau rigide, cette entretoise (fig. 34a) est constituée par une tôle cintrée, placée à l'intrados, fixée soit par des griffes, soit par des boulons, et des éléments de poutrelles à l'extrados des 2 cadres ; le diamètre des boulons d'assemblage est de 20 mm.

La figure 34b donne les dimensions de l'entretoise utilisée pour solidariser les 2 cadres des anneaux coulissants.

Pour les essais, on a placé 2 entretoises par élément de cadre.

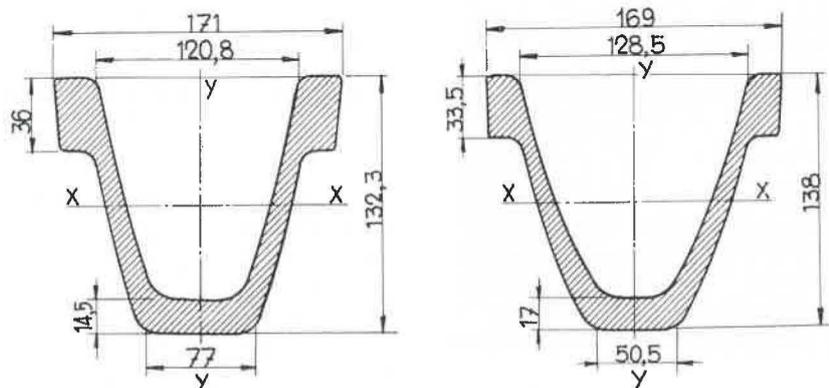


Fig. 33. — Comparaison des dimensions de l'ancien profil TH « 48 » avec le nouveau profil TH « 58 ».

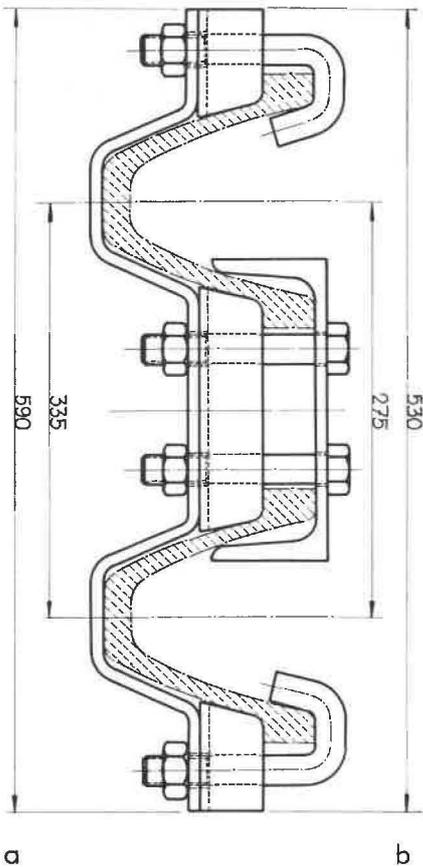


Fig. 34. — Entretoise utilisée pour solidariser les 2 cadres d'un :

- a) anneau rigide (essai 1)
- b) anneau coulissant (essais 2 et 3).

Dans les essais avec anneaux coulissants, afin d'empêcher tout frottement des carcans du cadre inférieur sur les plaques métalliques constituant le plancher d'essai de la Gimed, des plaques en acier

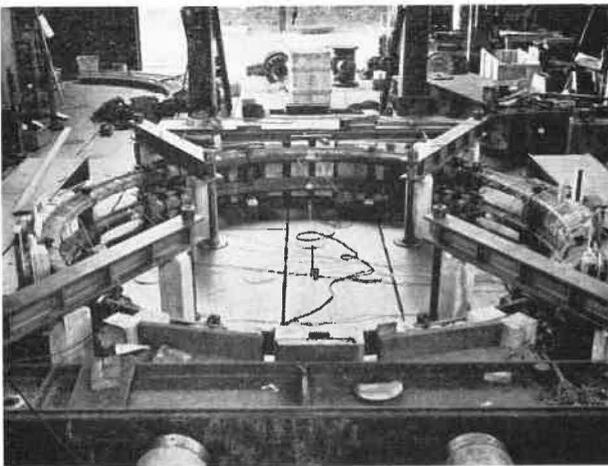


Fig. 35. — Installation du matériel lors du premier essai effectué sur un anneau constitué de 2 cadres circulaires rigides; on remarque les 4 assemblages utilisés pour empêcher le flambage éventuel des cadres vers le haut.

de 10 mm d'épaisseur ont été interposées entre les carcans et le plancher.

Pour ne pas gêner le coulissement des carcans, des tôles de 10 mm d'épaisseur, de 0,40 m de largeur et de 1,40 m de longueur ont été insérées entre les assemblages des cadres et les pièces de poussée ou de calage.

Les vérins utilisés pour appliquer les efforts sur les cadres ont des têtes plates (fig. 35). Leur position a été réglée pour que les axes soient situés dans le plan horizontal passant à mi-distance entre les 2 cadres. Pour empêcher tout flambage éventuel des cadres vers le haut, ceux-ci ont été bridés à leur partie supérieure par 4 fortes traverses métalliques disposées comme indiqué sur la fig. 35.

### 3. ESSAI SUR L'ANNEAU CIRCULAIRE RIGIDE (essai 1).

Les figures 35 et 36 montrent l'installation du matériel lors du premier essai effectué sur un anneau constitué de 2 cadres circulaires rigides, placés à une distance de 33,5 cm d'axe en axe. Les carcans d'assemblage reposent directement sur la dalle d'essai.

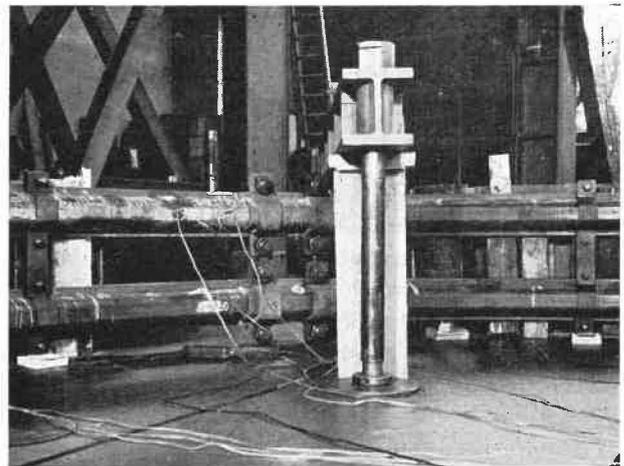


Fig. 36. — Vue d'une partie de l'anneau rigide avant l'essai montrant 2 entretoises de liaison entre les 2 cadres ainsi qu'une partie de l'assemblage des éléments de cadres; on remarque aussi sur la figure la position de quelques jauges de contraintes.

Le diamètre intérieur de l'anneau est de 4,32 m et le diamètre extérieur de 4,60 m. Les 2 cadres sont solidarités entre eux par 8 entretoises bien visibles sur la figure 35. Le serrage des boulons des étriers a été effectué avec une clef dynamométrique réglée à 45 kg/m.

Deux essais ( $t_1$  et  $t_{11}$ ) ont, en réalité, été effectués sur cet anneau rigide. Après avoir exercé des efforts croissants sur un quart de l'anneau jusqu'au flam-

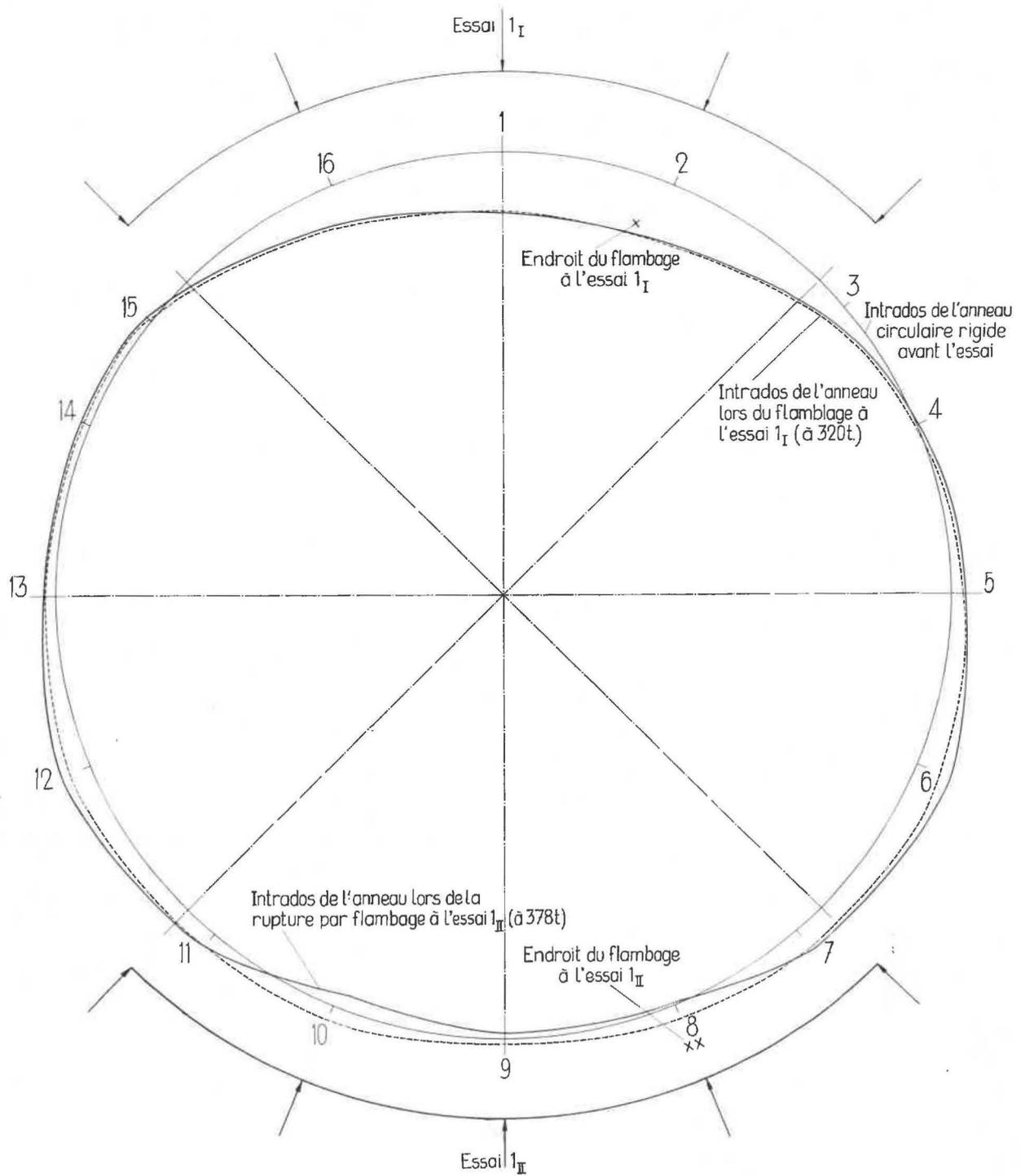


Fig. 37. — Déformation de l'anneau circulaire rigide à la charge de 320 t lors de l'essai 1<sub>I</sub> et à la charge de 378 t lors de l'essai 1<sub>II</sub>.

À l'essai 1<sub>II</sub>, la charge a été appliquée sur le quart de l'anneau opposé à celui du premier essai 1<sub>I</sub> après déformation du cadre.

bage de celui-ci (essai 1<sub>I</sub>), on a recommencé l'essai en exerçant cette fois des efforts croissants sur le quart opposé à celui du premier essai (essai 1<sub>II</sub>).

La charge maximum exercée avant le flambage des cadres fut de 320 t au cours de la première mise en charge et de 378 t au cours de la deuxième mise en charge. La figure 37 indique, par des croix, les

2 endroits où le flambage s'est produit.

Il faut observer ici que l'anneau rigide n'était plus circulaire au commencement de cette seconde mise en charge.

La résistance réelle au flambage d'un anneau circulaire de 4,32 m de diamètre doit donc être estimée à 320 t.

31. Première mise en charge (essai 1<sup>1</sup>).

## 311. Déformation de l'anneau rigide.

La figure 37 montre la déformation de l'anneau à la charge de 320 t, peu avant le flambage. Le diamètre intérieur parallèle à la direction des efforts, qui était de 4,32 m avant l'essai, est passé à 4,06 m, tandis que perpendiculairement à la direction des efforts la longueur du diamètre est passée de 4,32 à 4,44 m.

Le tableau VIII donne les variations des « diamètres » intérieurs initiaux numérotés 1 à 8 sur la figure 38.

Les diamètres 1, 2, 7 et 8 se sont raccourcis au cours de l'essai de 9 à 26 cm, tandis que les diamètres 4, 5 et 6 se sont allongés de 9 à 16 cm. On constate que l'allongement maximum a eu lieu suivant la direction 6.

Les deux courbes de la figure 39 indiquent les variations des diamètres initiaux 1 et 5 en fonction de la charge appliquée. On constate une modification importante de la longueur du diamètre 1 à partir d'une charge de 240 t. La figure 40 montre l'état de l'anneau à la fin de la première mise en charge.

Avant l'essai, la section utile était de 14,52 m<sup>2</sup>.

TABLEAU VIII.

Variation des « diamètres » de l'anneau rigide au cours de la première mise en charge.

| Charge en t | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0           | 4,32  | 4,32  | 4,32  | 4,32  | 4,32  | 4,32  | 4,32  | 4,32  |
| 40          | 4,30  | 4,305 | 4,295 | 4,33  | 4,34  | 4,34  | 4,29  | 4,32  |
| 80          | 4,27  | 4,28  | 4,295 | 4,345 | 4,345 | 4,245 | 4,285 | 4,305 |
| 120         | 4,245 | 4,26  | 4,30  | 4,36  | 4,36  | 4,36  | 4,31  | 4,28  |
| 160         | 4,225 | 4,24  | 4,30  | 4,36  | 4,37  | 4,37  | 4,30  | 4,265 |
| 200         | 4,19  | 4,21  | 4,31  | 4,385 | 4,385 | 4,395 | 4,32  | 4,25  |
| 240         | 4,175 | 4,20  | 4,305 | 4,39  | 4,39  | 4,405 | 4,33  | 4,25  |
| 280         | 4,095 | 4,13  | 4,31  | 4,40  | 4,42  | 4,455 | 4,39  | 4,22  |
| 320         | 4,06  | 4,10  | 4,32  | 4,43  | 4,435 | 4,48  | 4,41  | 4,205 |

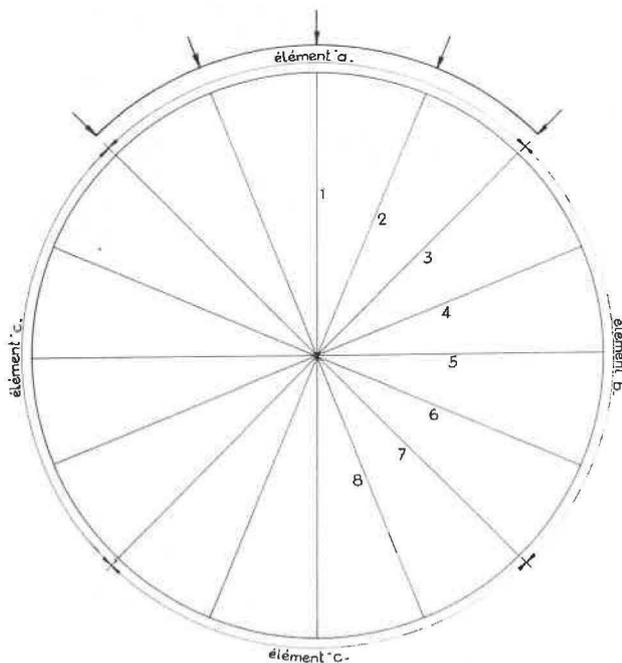


Fig. 38. — Emplacement des diamètres 1 à 8 du tableau VIII par rapport à la direction des efforts sur l'anneau constitué de 2 cadres rigides constitués chacun de 4 éléments a, b, c et d.

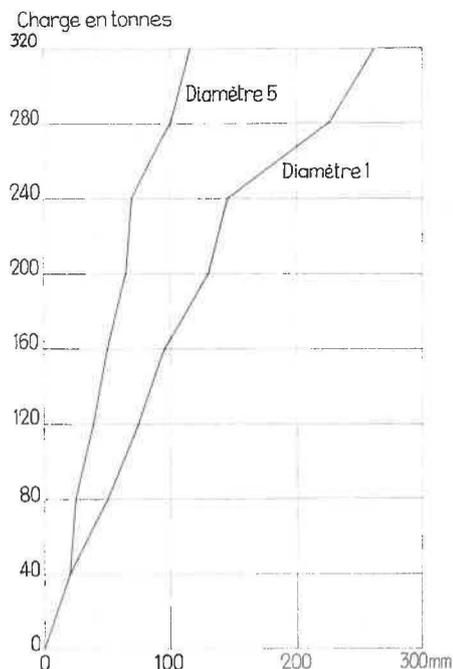


Fig. 39. — Variation de longueur des « diamètres » 1 et 5 en fonction de la charge appliquée (diminution du « diamètre » initial 1 et augmentation du « diamètre » 5).

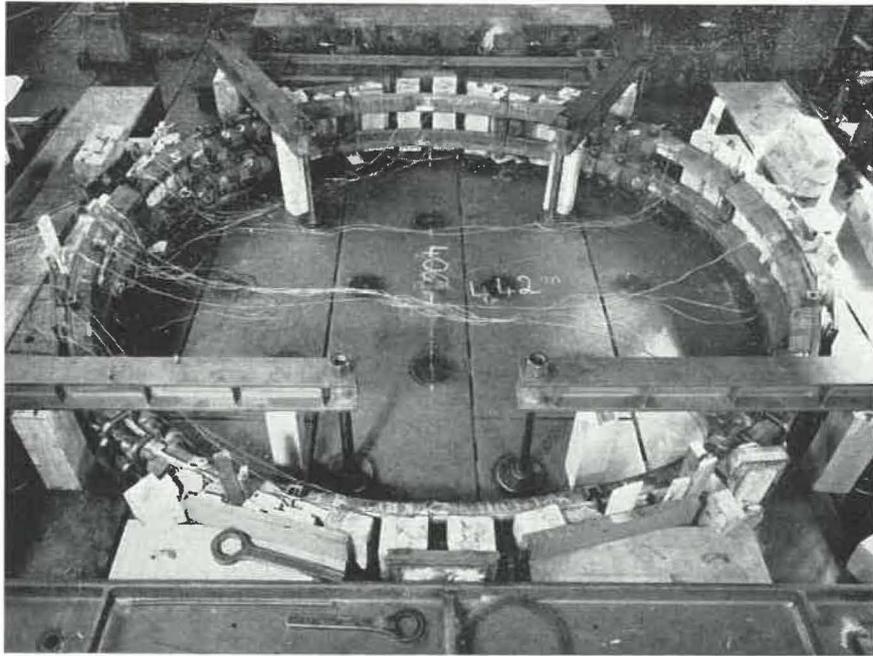


Fig. 40. — Photo prise après le flambage de l'anneau rigide à la charge de 320 t à l'essai 1<sub>r</sub>. La partie de l'anneau sur laquelle la charge a été exercée se trouve vers le haut de la photo; on aperçoit bien l'endroit où le flambage s'est produit à droite de l'inscription  $k = 2,05$  au-delà de l'entretoise de liaison entre cadres.

Après la première mise en charge, la section est passée à  $14,32 \text{ m}^2$ , ce qui correspond à une diminution de 1,4 % par rapport à la section avant l'essai.

### 312. Flambage des cadres.

Le flambage des 2 cadres rigides s'est produit près du point 2 (fig. 37).

Les figures 41 et 42 montrent la façon dont les deux cadres rigides ont flambé par écartement des deux lèvres du profil du cadre. Le gonflement de la lèvre supérieure du cadre supérieur était de 6 mm.

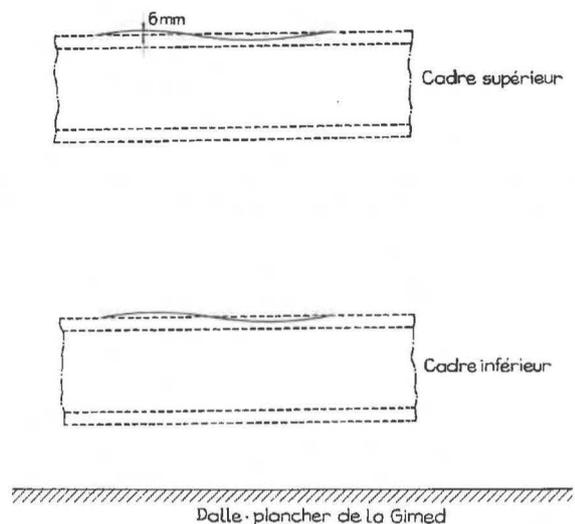


Fig. 41. — Schéma montrant les déformations locales du profil des cadres à l'endroit du flambage.

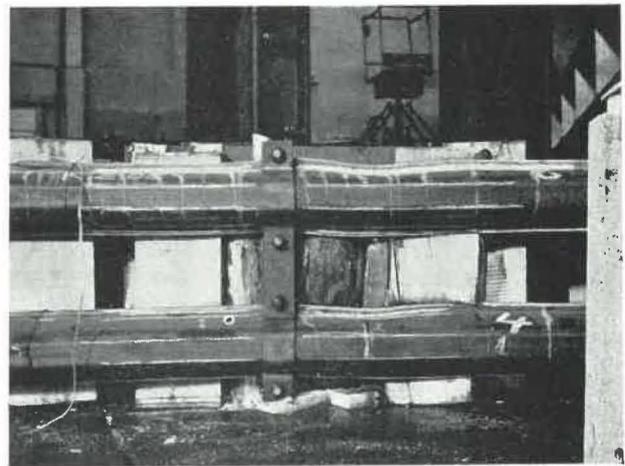


Fig. 42. — Photo montrant les déformations des 2 cadres à l'endroit du flambage.

### 313. Soulèvement des cadres.

Tout au long des essais, les 2 cadres sont restés parallèles l'un à l'autre : il n'y eut aucune rupture du système de liaison entre cadres. Le tableau IX indique le soulèvement de l'ensemble des 2 cadres sous l'effet de la mise en charge. Ces soulèvements ont été mesurés à divers points sur le pourtour intérieur des cadres. Les points de mesure indiqués (2 à 16) correspondent à ceux représentés à la figure 37.

TABLEAU IX.

Soulèvement de l'ensemble des 2 cadres rigides.

| Charge en t | Soulèvement aux points de mesure en mm |   |   |   |    |    |    |    |
|-------------|--|---|---|---|----|----|----|----|
|             | 2                                      | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 |
| 0           | 0                                      | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 120         | 0                                      | 2 | 0 | 3 | 1  | 0  | 0  | 0  |
| 160         | 0                                      | 3 | 0 | 4 | 1  | 0  | 0  | 0  |
| 240         | 0                                      | 5 | 0 | 5 | 2  | 0  | 0  | 0  |
| 280         | 0                                      | 7 | 3 | 6 | 7  | 0  | 0  | 0  |

On constate que les soulèvements sont faibles.

314. Variation des rayons de courbure.

Par suite de la déformation des cadres avant le flambage de l'anneau, les carcans n'épousaient plus exactement la forme des cadres et il y avait un baillement de 3 à 10 mm aux divers carcans (fig. 43) ; ce baillement était de 3 ou 4 mm à 3 des 4 assemblages et de 10 mm à l'assemblage placé près de l'endroit où s'est produit le flambage.

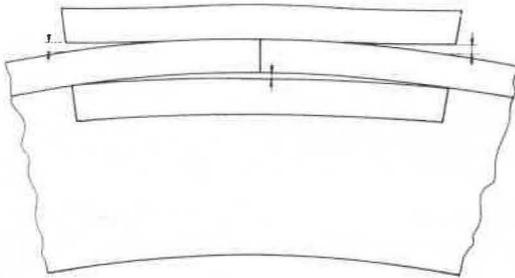


Fig. 43. — Baillement des éléments d'assemblage des cadres rigides par suite de la déformation de l'anneau.

On constate qu'après l'essai, le rayon de courbure varie fort d'un endroit à l'autre sur le pourtour des cadres. Avant la première mise en charge, il était de 2,16 m. Pendant la mise en charge, le quart de cercle sollicité s'est fortement aplati.

A la fin de l'essai, soit après flambage, le rayon de courbure atteignait 10 m près de l'endroit où le flambage s'est produit et 4,60 m à l'autre assemblage du quart de cercle sollicité.

315. Variations des tensions dans l'acier des cadres.

Les tensions dans l'acier des éléments des cadres ont été mesurées en 27 points à l'aide des jauges de contraintes placées aux endroits indiqués sur les figures 44 et 45. La figure 44 indique les emplacements des 19 jauges sur le cadre supérieur et la figure 45 indique les emplacements des 8 jauges sur le cadre inférieur.

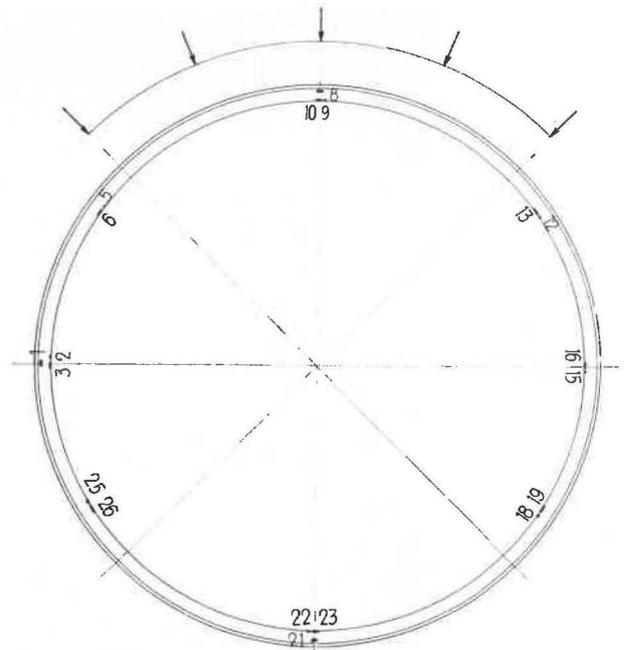


Fig. 44. — Emplacement des 19 jauges de contraintes utilisées pour mesurer les tensions dans l'acier du cadre supérieur de l'anneau circulaire rigide.

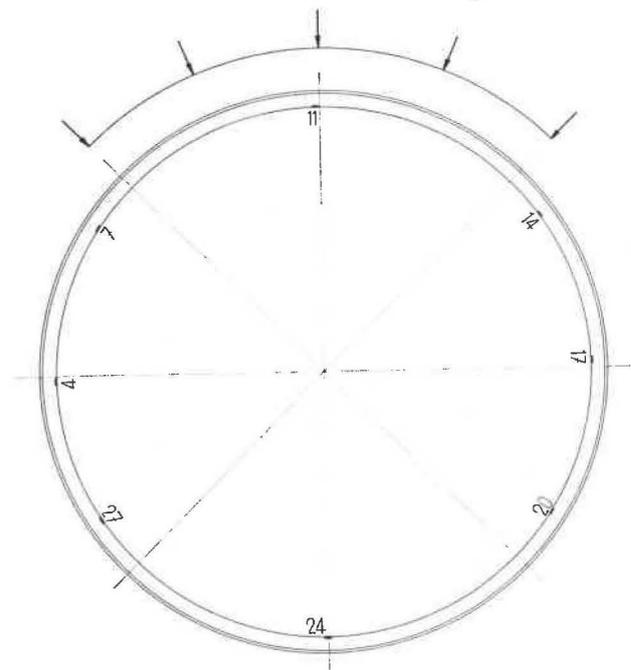


Fig. 45. — Emplacement des 8 jauges de contraintes réparties sur le cadre inférieur.

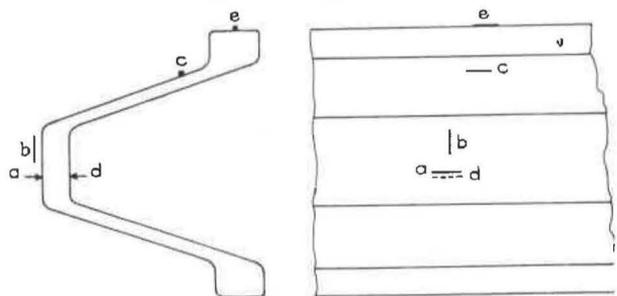


Fig. 46. — Position des jauges sur le profil des cadres ; les jauges peuvent occuper 5 positions indiquées a à e. Les jauges a, c, d et e mesurent des tensions longitudinales, tandis que les jauges b mesurent des tensions transversales.

Suivant leurs positions par rapport au profil du cadre (fig. 46), les jauges ont été réparties dans les groupes suivants :

a) jauges collées à la face intrados du cadre mesurant les tensions dans l'axe longitudinal du cadre (jauge indiquée par « a » sur la fig. 46) :

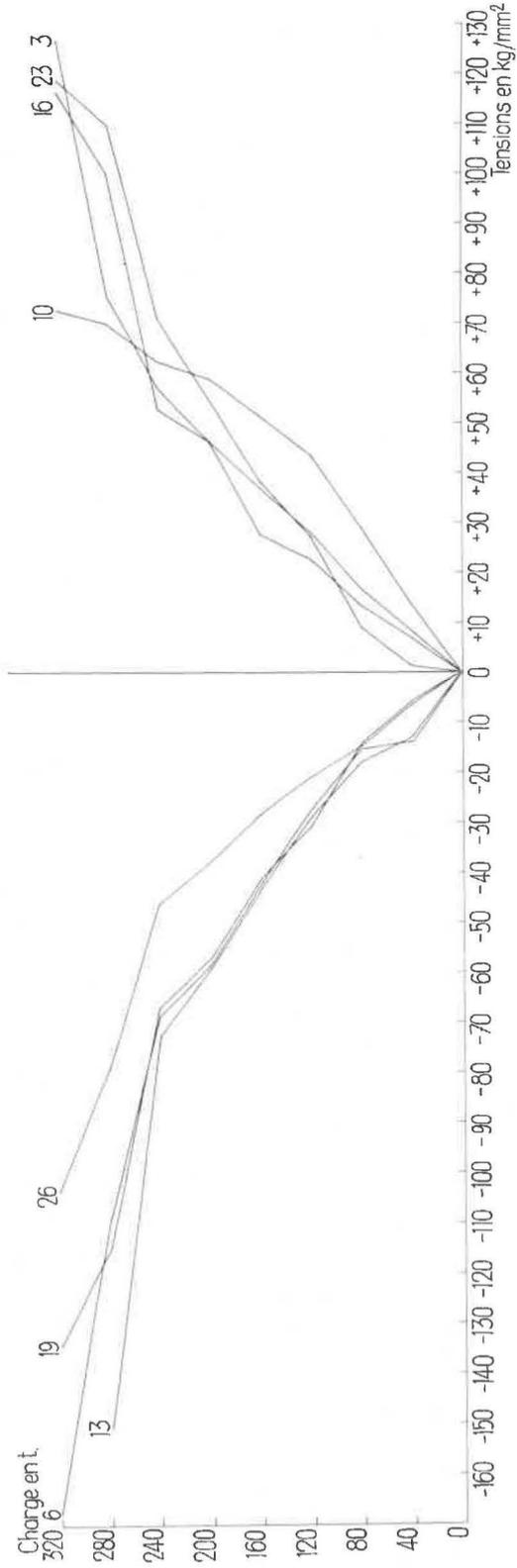


Fig. 47. — Variation des tensions dans l'acier en fonction de la charge appliquée pour les 8 jauges « a » du cadre supérieur.

jauges 3, 6, 10, 13, 16, 19, 23 et 26 de la figure 44 - jauges 4, 7, 11, 14, 17, 20, 24 et 27 de la figure 45 ;

b) jauges collées à la face intrados du cadre mesurant les tensions dans le sens transversal du ca-

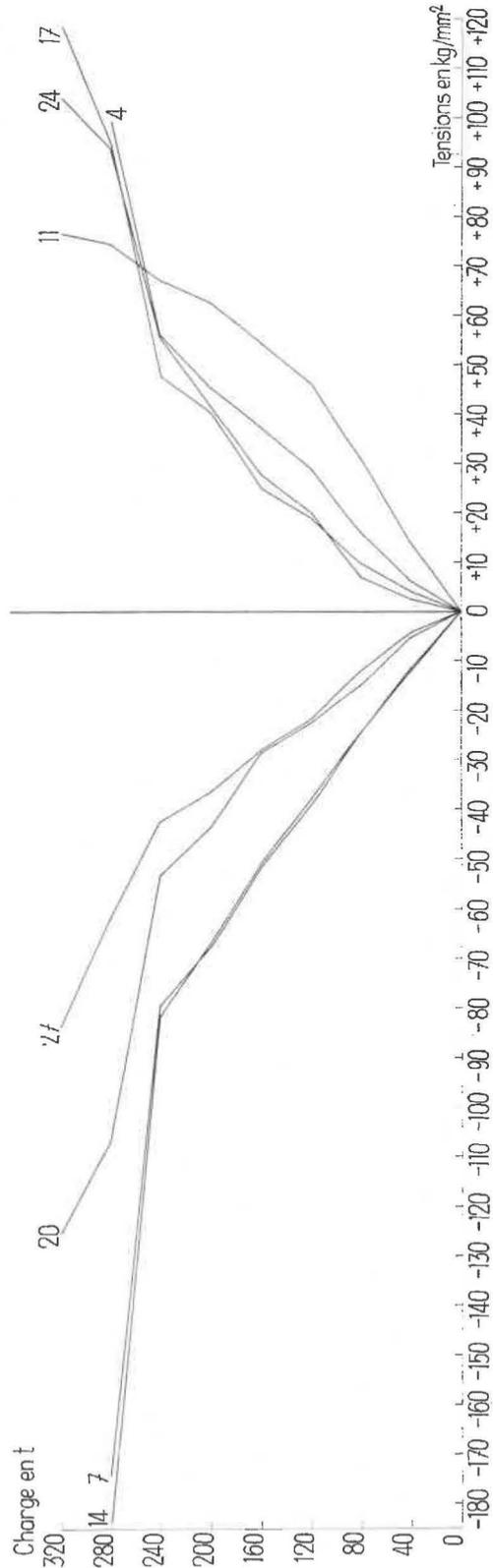


Fig. 48. — Variation des tensions dans l'acier en fonction de la charge appliquée pour les 8 jauges « a » du cadre inférieur.

dre (jauge indiquée « b » sur la fig. 46) - jauges 2, 5, 9, 12, 15, 18, 22 et 25 de la figure 44 ;

c) jauges collées sur un flanc du cadre mesurant les tensions dans l'axe longitudinal des cadres (jauge indiquée « c » sur la fig. 46) : jauges 1, 8 et 21 de la figure 44.

Les graphiques des figures 47 à 50 montrent les variations des contraintes en fonction de la charge appliquée.

Les valeurs données par les jauges utilisées ne sont plus exactes dès que la contrainte dépasse  $50 \text{ kg/mm}^2$  (limite d'élasticité de l'acier des cadres : 55 à  $58 \text{ kg/mm}^2$ ).

Une contrainte de  $10 \text{ kg/mm}^2$  a été atteinte à une charge de 28 t à la jauge 11.

Une contrainte de  $20 \text{ kg/mm}^2$  a été atteinte à une charge de 52 t à la jauge 11. A la charge de 80 t, les 4 jauges 7, 10, 11 et 14 subissent une contrainte supérieure à  $20 \text{ kg/mm}^2$ , les contraintes étant de traction aux jauges 10 et 11 et de compression pour les 2 autres.

Une contrainte de  $50 \text{ kg/mm}^2$  a été atteinte à une charge de 147 t à la jauge 11.

A la charge de 280 t, 24 des 27 jauges ont subi une contrainte supérieure à  $50 \text{ kg/mm}^2$ .

La figure 51 indique les variations des tensions tangentielles dans l'acier des cadres circulaires rigides, mesurées au moyen des jauges collées sur la face intrados des cadres suivant leur axe longitudinal (jauge « a » de la figure 46) pour différentes charges.

On constate une symétrie assez parfaite des tensions dans l'acier par rapport à l'axe des charges

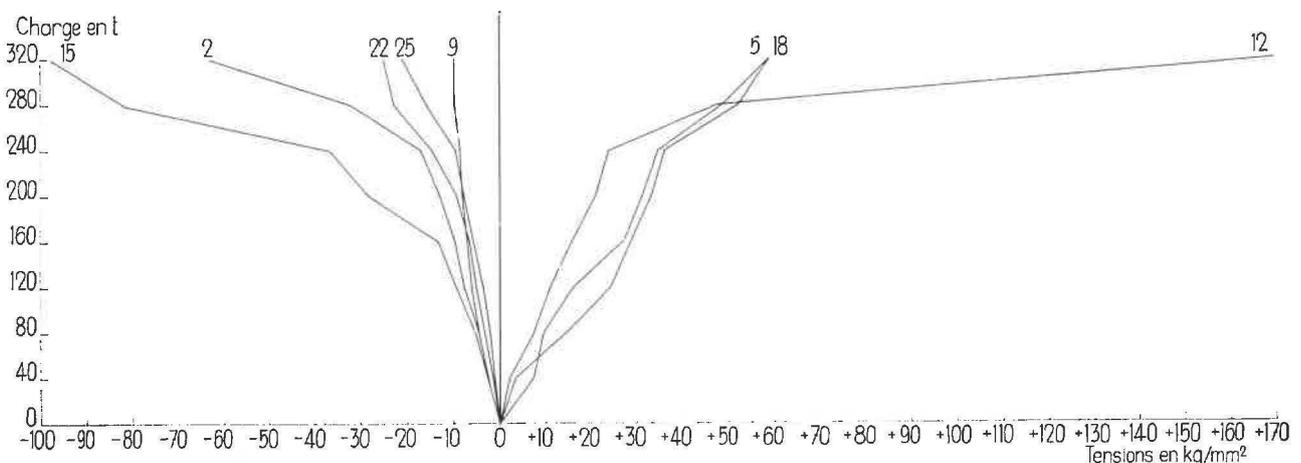


Fig. 49. — Variation des tensions dans l'acier en fonction de la charge appliquée pour les 8 jauges « b » du cadre supérieur.

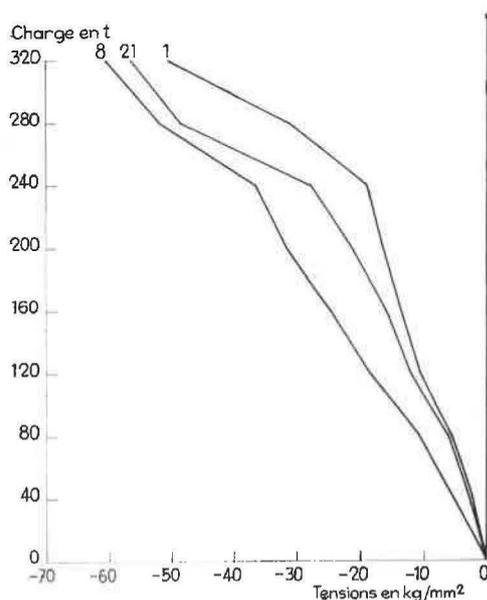


Fig. 50. — Variation des tensions dans l'acier en fonction de la charge appliquée pour les 3 jauges « c » du cadre supérieur.

appliquées et à la direction perpendiculaire. Il y a 4 zones dans lesquelles l'acier est tendu sur la face intrados et 4 zones d'égale importance dans lesquelles l'acier est comprimé sur la face intrados.

A la charge de 280 t, on aperçoit une augmentation rapide de la tension de compression en haut et à droite du cadre, tout près de l'endroit où se produira le flambage. Ce flambage s'est produit à la limite des zones des tensions tangentielles de traction et de compression.

Les 4 zones, où les contraintes longitudinales à la face intrados sont des tractions, correspondent à des zones dans lesquelles le rayon de courbure des éléments de cadre ont tendance à augmenter, donc à ouvrir les cadres.

### 316. Charges reprises par les vérins-dynamomètres.

Le tableau X donne les réactions reprises par les deux vérins dynamomètres en fonction de la charge appliquée sur le quart de l'anneau opposé.

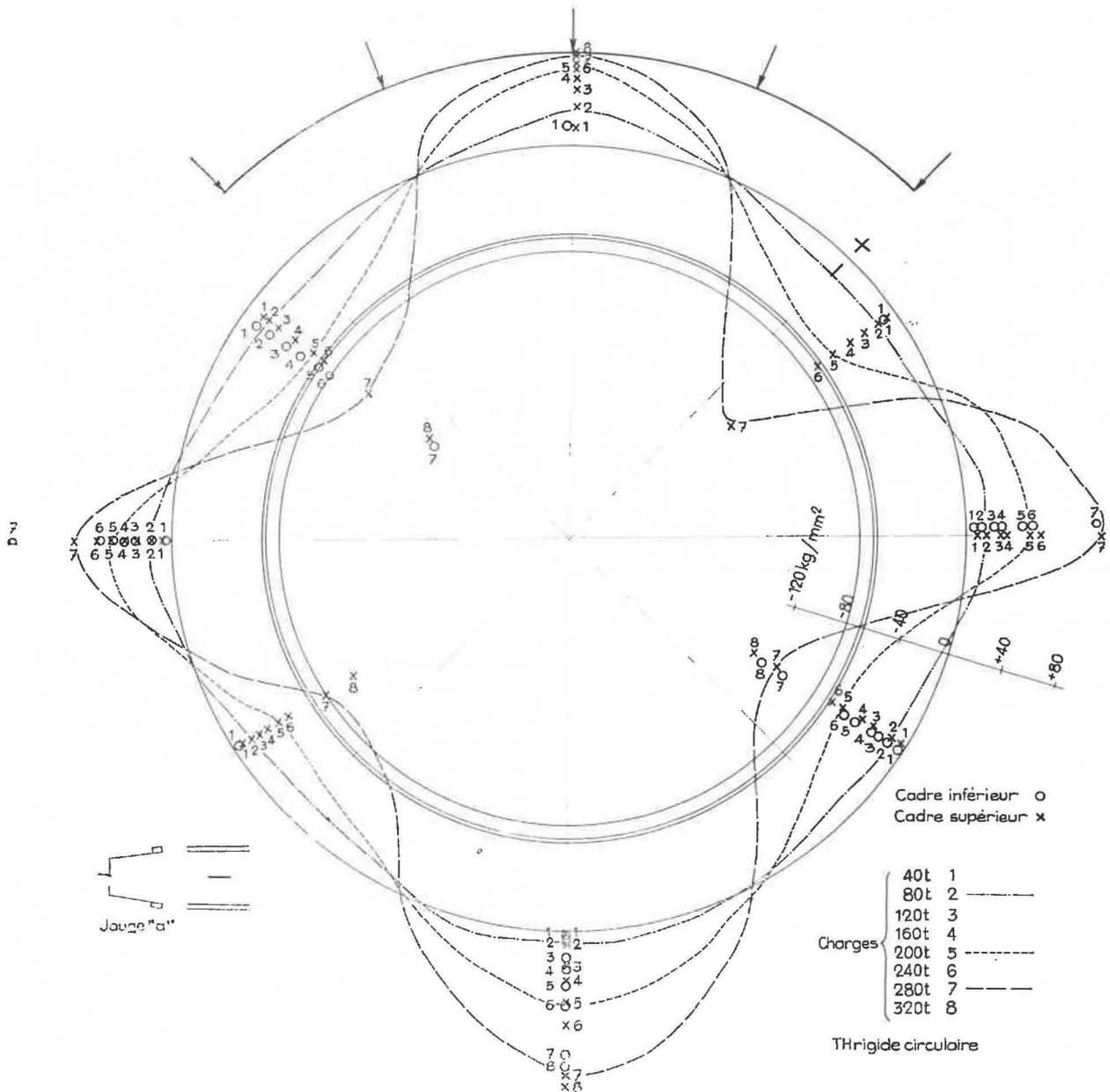


Fig. 51. — Variation des tensions dans l'acier de l'anneau circulaire rigide mesurées au moyen des jauges collées sur la face intrados des cadres suivant l'axe longitudinal des cadres (jauge « a ») pour différentes charges (échelle des tensions : 1 cm = 40 kg/mm<sup>2</sup>).

TABLEAU X.

| Charge totale exercée en t | Charge reprise par les vérins-dynamomètres en t | Pourcentage des charges transmises aux vérins-dynamomètres en % | Différence entre les charges transmises et reprises en t |
|----------------------------|---|---|--|
| 40                         | 18  | 45  | 22   |
| 80                         | 32  | 40  | 48   |
| 120                        | 70  | 58  | 50   |
| 160                        | 86  | 54  | 74   |
| 200                        | 126   | 63  | 74   |
| 240                        | 146   | 61  | 94   |
| 280                        | 164   | 59  | 116  |
| 320                        | 182   | 57  | 138  |

On constate qu'à partir d'une charge de 120 t, le rapport entre la charge reprise par les 2 vérins-dynamomètres et la charge exercée est voisin de 60 %.

**32. Seconde mise en charge (essai III).**

Rappelons que, pour ce second essai, la charge est appliquée sur le quart opposé à celui du premier essai.

**321. Déformation de l'anneau rigide.**

Au début de cette seconde mise en charge, l'anneau n'est plus circulaire mais elliptique ; la lon-

gueur intérieure du plus grand axe est de 4,48 m et celle du plus petit axe de 4,06 m.

Les figures 37 et 52 montrent la déformation de l'anneau à la charge de 378 t.

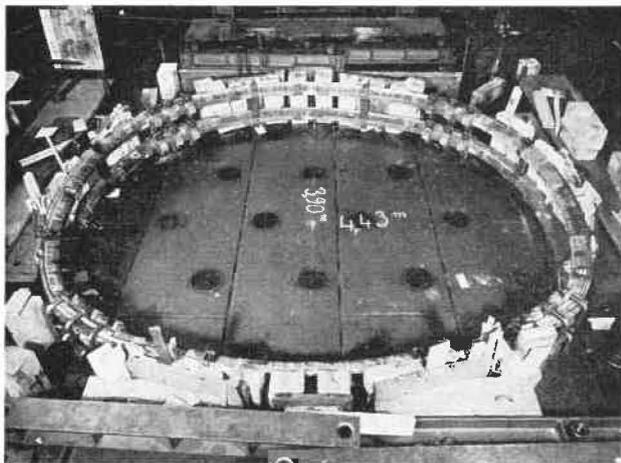


Fig. 52. — Photo prise après le flambage de l'anneau rigide à la charge de 378 t à l'essai 1II. Pour l'essai 1I la charge était appliquée à la partie du cadre située en haut de la photo tandis qu'à l'essai 1II la charge a été appliquée à la partie du cadre située en bas de la photo. Le flambage s'est produit en bas à droite entre une entretoise et un assemblage de cadres.

On constate, à la figure 37, que la déformation du cadre a été très faible. Le diamètre intérieur parallèle à la direction des efforts est passé de 4,06 m à 3,89 m, tandis que perpendiculairement à la direction des efforts, l'axe n'a pratiquement pas varié.

Le tableau XI donne les variations des « diamètres » intérieurs initiaux numérotés 1 à 8 sur la figure 38.

Les diamètres 1, 2, 3 et 8 se sont raccourcis au cours de l'essai de 1 à 17 cm.

### 322. Flambage des cadres.

Les deux croix de la figure 37 indiquent l'endroit où le flambage s'est produit du côté de la charge appliquée, à proximité du point 8.



Fig. 53. — Détail du flambage des cadres ; on constate les variations du rayon de courbure près de l'assemblage.

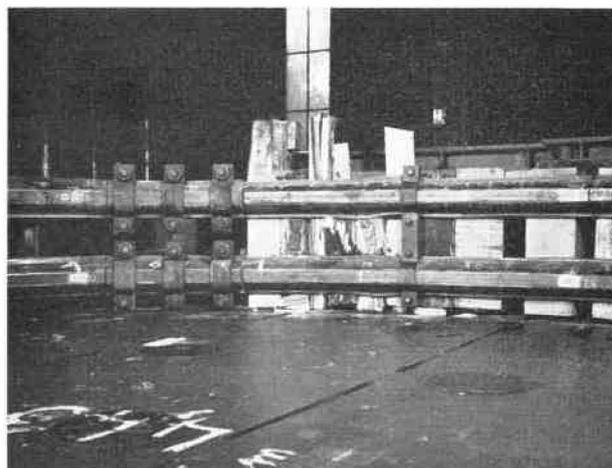


Fig. 54. — Photo montrant les déformations des 2 cadres à l'endroit du flambage.

TABLEAU XI.

| Variations des « diamètres » de l'anneau rigide au cours de la 2 <sup>e</sup> mise en charge (essai 1II). |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Charge en t   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| 0   | 4,06  | 4,10  | 4,52  | 4,45  | 4,455 | 4,48  | 4,41  | 4,205 |
| 240   | 4,05  | 4,095 | 4,52  | 4,45  | 4,455 | 4,49  | 4,41  | 4,21  |
| 280   | 4,03  | 4,08  | 4,52  | 4,445 | 4,44  | 4,495 | 4,415 | 4,19  |
| 320   | 3,995 | 4,065 | 4,525 | 4,455 | 4,44  | 4,505 | 4,41  | 4,16  |
| 360   | 3,93  | 4,045 | 4,52  | 4,47  | 4,445 | 4,54  | 4,425 | —     |
| 375   | 3,89  | 3,965 | 4,51  | 4,475 | 4,44  | 4,54  | 4,45  | —     |

Les figures 53 et 54 montrent la façon dont les deux cadres rigides ont flambé par pliage d'un élément de cadre dans son plan axial.

**323. Soulèvement des cadres.**

Le tableau XII indique le soulèvement de l'ensemble des 2 cadres sous l'effet de la mise en charge. Ces soulèvements ont été mesurés à divers points sur le pourtour intérieur des cadres. Les points indiqués correspondent à ceux représentés à la figure 57.

Au début de cette seconde mise en charge, le cadre était déjà localement soulevé par suite du premier essai ; ce soulèvement préalable est indiqué au tableau à la charge de 0 t.

TABLEAU XII.

*Soulèvement de l'ensemble des 2 cadres rigides.*

| Charge en t | Soulèvement aux points de mesures en mm |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------|---|----|----|----|----|----|----|----|
|             | 2                                       | 4  | 6  | 8  | 10 | 12 | 14 | 16 |
| 0 t         | 0                                       | 7  | 3  | 6  | 7  | 0  | 0  | 0  |
| 360 t       | 0                                       | 14 | 14 | 15 | 21 | 9  | 9  | 2  |

**324. Variations des rayons de courbure.**

La figure 55 montre les déformations de la courbure de certains éléments du cadre. Les deux éléments placés respectivement en haut et en bas sur cette figure sont des éléments indiqués b sur la figure 38, et leur extrémité devenue rectiligne se trouvait à l'assemblage situé à côté de l'endroit du flambage.

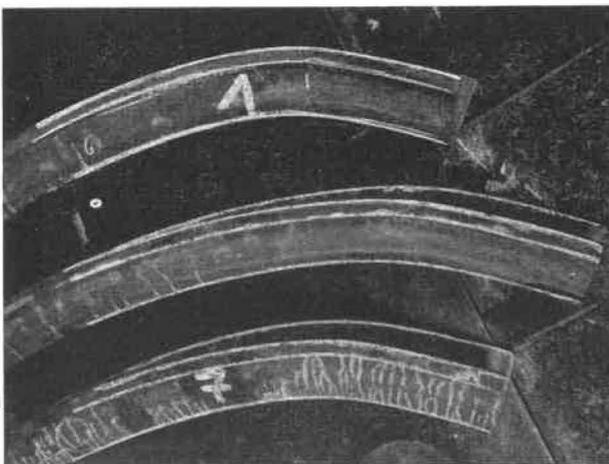


Fig. 55. — Déformations locales des rayons de courbures des éléments des cadres rigides après l'essai I<sub>II</sub>.

A la fin de la seconde mise en charge de l'anneau rigide, les rayons de courbure avaient les valeurs suivantes à divers endroits de l'anneau :

- à l'emplacement 2 (fig. 37) R = 17 m
- à l'emplacement 7 R = 11,50 m
- à l'emplacement 11 R = 14 m
- à l'emplacement 15 R = 17 m

**325. Déformations du profil des cadres.**

La figure 56 montre les déformations transversales des cadres avec, soit un rapprochement, soit un écartement des 2 lèvres du cadre.

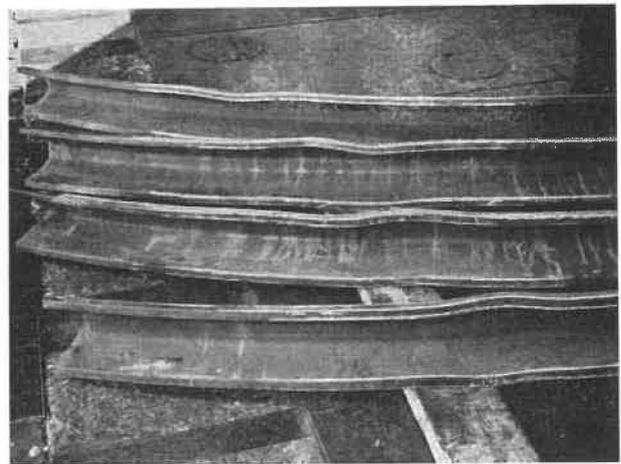


Fig. 56. — Déformations transversales du profil des cadres avec soit un rapprochement, soit un écartement des 2 lèvres du cadre.

Le tableau XIII indique les variations de l'écartement extérieur des lèvres du profil de chacun des éléments de cadre indiqués a, b, c et d sur la figure 38. Avant l'essai, cette distance était de 160 mm.

TABLEAU XIII.

*Ecartement ou rapprochement des lèvres du cadre.*

| Élément du cadre | Distance minimale en mm | Distance maximale en mm |
|------------------|-------------------------|-------------------------|
| a sup.           | 165                     | 176                     |
| a inf.           | 160                     | 172                     |
| b sup.           | 165                     | 175                     |
| b inf.           | 165                     | 175                     |
| c sup.           | 164                     | 194                     |
| c inf.           | 162                     | 186                     |
| d sup.           | 167                     | 172                     |
| d inf.           | 165                     | 172                     |

La figure 57 indique les variations de cet écartement entre lèvres de cadre mesurées à divers endroits du contour du cadre en contact avec le plancher de la dalle d'essai, après flambage à la charge de 378 t.

**327. Charges reprises par les vérins-dynamomètres.**

Le tableau XIV donne les réactions reprises par les deux vérins-dynamomètres en fonction de la charge appliquée sur le quart de l'anneau opposé.

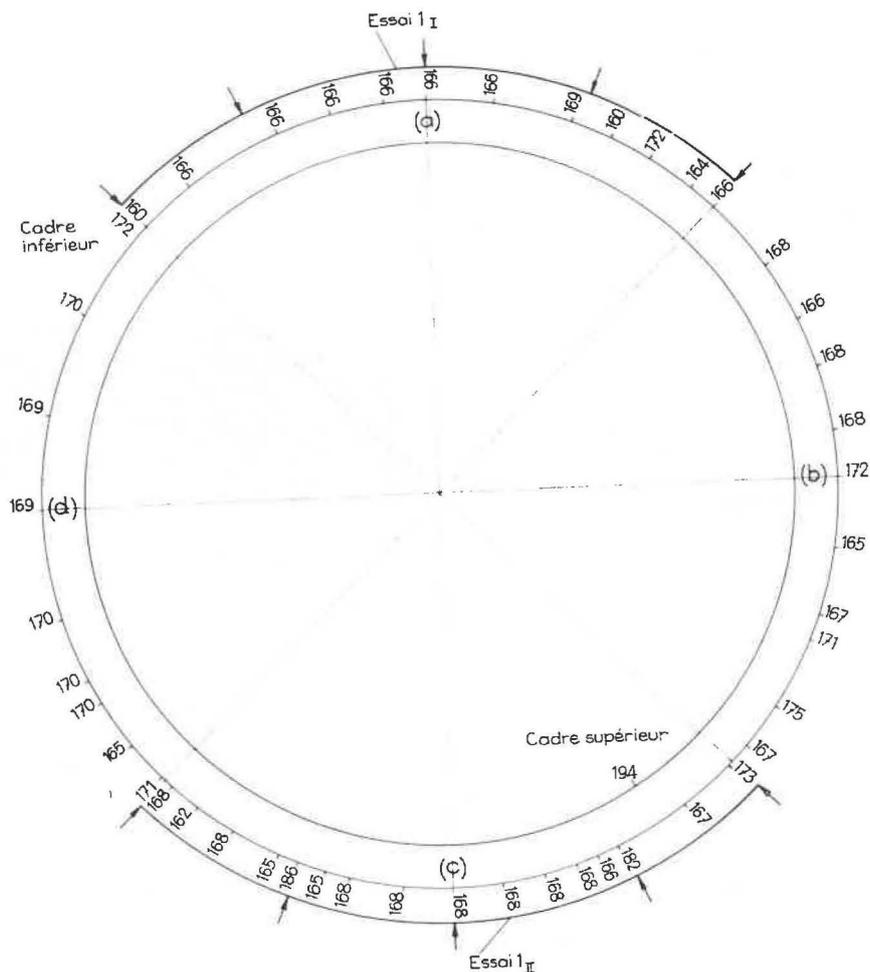


Fig. 57. — Variation de l'écartement des lèvres du profil transversal des cadres en fonction de leur position après les essais I<sub>I</sub> et I<sub>II</sub>. On constate que les plus grandes variations dans l'écartement des lèvres se sont produites aux éléments de cadres sur lesquels les charges ont été appliquées.

On constate que ce sont les éléments a et c, situés du côté des charges, qui ont été les plus déformés.

**326. Variation des tensions dans l'acier des cadres.**

Aucune nouvelle jauge n'a été placée pour mesurer les variations des tensions dans l'acier ; les mesures se sont poursuivies avec les quelques jauges placées avant la première mise en charge et qui indiquaient une contrainte inférieure à 55 kg/mm<sup>2</sup>.

La jauge 9 (fig. 44) indique une augmentation du taux de compression jusque 34 kg/mm<sup>2</sup> à la charge de 320 t, tandis que pour la jauge 22, le taux de compression monte jusque 49.4 kg/mm<sup>2</sup> à la même charge.

La contrainte mesurée par la jauge 25 atteint 60 kg/mm<sup>2</sup> à 320 t.

TABLEAU XIV.

| Charge totale exercée en t | Charge reprise par les vérins-dynamomètres en t | Pourcentage de charge transmise aux vérins-dynamomètres en % | Différence entre les charges transmises et reprises en t |
|----------------------------|---|--|--|
| 0                          | 146 (*)   | —  | —  |
| 160                        | 204   | —  | —  |
| 240                        | 210   | 88   | 30   |
| 280                        | 230   | 83   | 50   |
| 320                        | 244   | 76   | 76   |
| 360                        | 260   | 73   | 100  |

(\*) Cette charge était la charge résiduelle qui était encore exercée par suite de la déformation du cadre à la suite de la première mise en charge.

**4. ESSAI SUR L'ANNEAU CIRCULAIRE COULISSANT (essai 2).**

La figure 58 montre l'installation du matériel lors de l'essai effectué sur un anneau constitué de 2 cadres circulaires coulissants placés à une distance de 27,5 cm d'axe en axe.

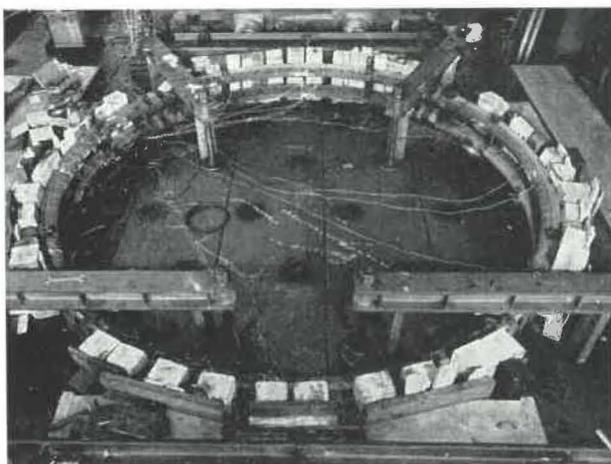


Fig. 58. — Installation du matériel avant l'essai effectué sur un anneau constitué de 2 cadres circulaires coulissants.

Le diamètre intérieur de l'anneau est de 4,32 m et le diamètre extérieur de 4,60 m. Les 2 cadres sont solidarisés entre eux par 8 entretoises.

On constate à la figure 58 que l'élément de cadre, se trouvant du côté où la charge est appliquée, est situé à l'extrados des 2 éléments voisins, le carcan à 4 boulons étant situé du côté des éléments voisins.

Le serrage des boulons des carcans a été effectué avec une clef dynamométrique, réglée d'abord à 38 kgm puis à 44 kgm.

Les boulons étant d'abord serrés avec un effort de 38 kgm, un premier coulissement s'est produit à une charge de 148 t.

Après un resserrage de tous les boulons avec le même effort de 38 kgm, un nouveau coulissement s'est produit à une charge de 195 t.

Après un serrage de tous les boulons avec un effort de 44 kgm, le premier coulissement s'est produit à une charge de 273 t.

La charge maximum exercée avant flambage fut de 317 t.

**41. Déformation de l'anneau circulaire coulissant.**

La figure 59 montre la déformation de l'anneau aux charges suivantes :

- a) à la charge de 273 t lors du premier coulissement après le serrage des boulons avec un effort de 44 kg ;
- b) à la charge de 280 t après de très nombreux coulissements ;
- c) après flambage à la charge de 317 t.

A la fin de l'essai, le « diamètre intérieur parallèle à la direction des efforts » est passé de 4,32 m à 3,605 m et le « diamètre » perpendiculaire de 4,32 à 4,39 m.

Le tableau XV donne les variations des « diamètres » intérieurs initiaux numérotés 1 à 8 sur la figure 38.

**TABLEAU XV.**  
*Variations des « diamètres » de l'anneau circulaire coulissant.*

| Charge en t                              | Diamètres en m |       |       |       |       |       |       |       |
|--|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | 1              | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| 0  | 4,32           | 4,32  | 4,32  | 4,32  | 4,32  | 4,32  | 4,32  | 4,32  |
| 40                                       | 4,31           | 4,32  | 4,315 | 4,34  | 4,33  | 4,33  | 4,32  | 4,30  |
| 80                                       | 4,295          | 4,30  | 4,315 | 4,35  | 4,35  | 4,345 | 4,32  | 4,295 |
| 120                                      | 4,280          | 4,290 | 4,32  | 4,35  | 4,355 | 4,355 | 4,325 | 4,28  |
| 160                                      | 4,195          | 4,235 | 4,290 | 4,345 | 4,365 | 4,37  | 4,325 | 4,24  |
| 200                                      | 4,125          | 4,165 | 4,255 | 4,330 | 4,340 | 4,34  | 4,405 | 4,17  |
| 273                                      | 4,075          | 4,125 | 4,200 | 4,305 | 4,375 | 4,31  | 4,355 | 4,130 |
| 292                                      | 3,88           | 3,975 | 4,145 | 4,320 | 4,065 | 4,32  | 4,270 | 3,985 |
| 317                                      | 3,79           | 3,905 | 4,110 | 4,320 | 4,375 | 4,310 | 4,210 | 3,885 |
| 280 après de très nombreux coulissements | 3,700          | 3,895 | 4,180 | 4,345 | 4,38  | 3,305 | 4,180 | —     |
| Après flambage                           | 3,605          | 3,860 | 4,145 | 4,290 | 4,39  | 4,245 | 4,160 | 3,605 |

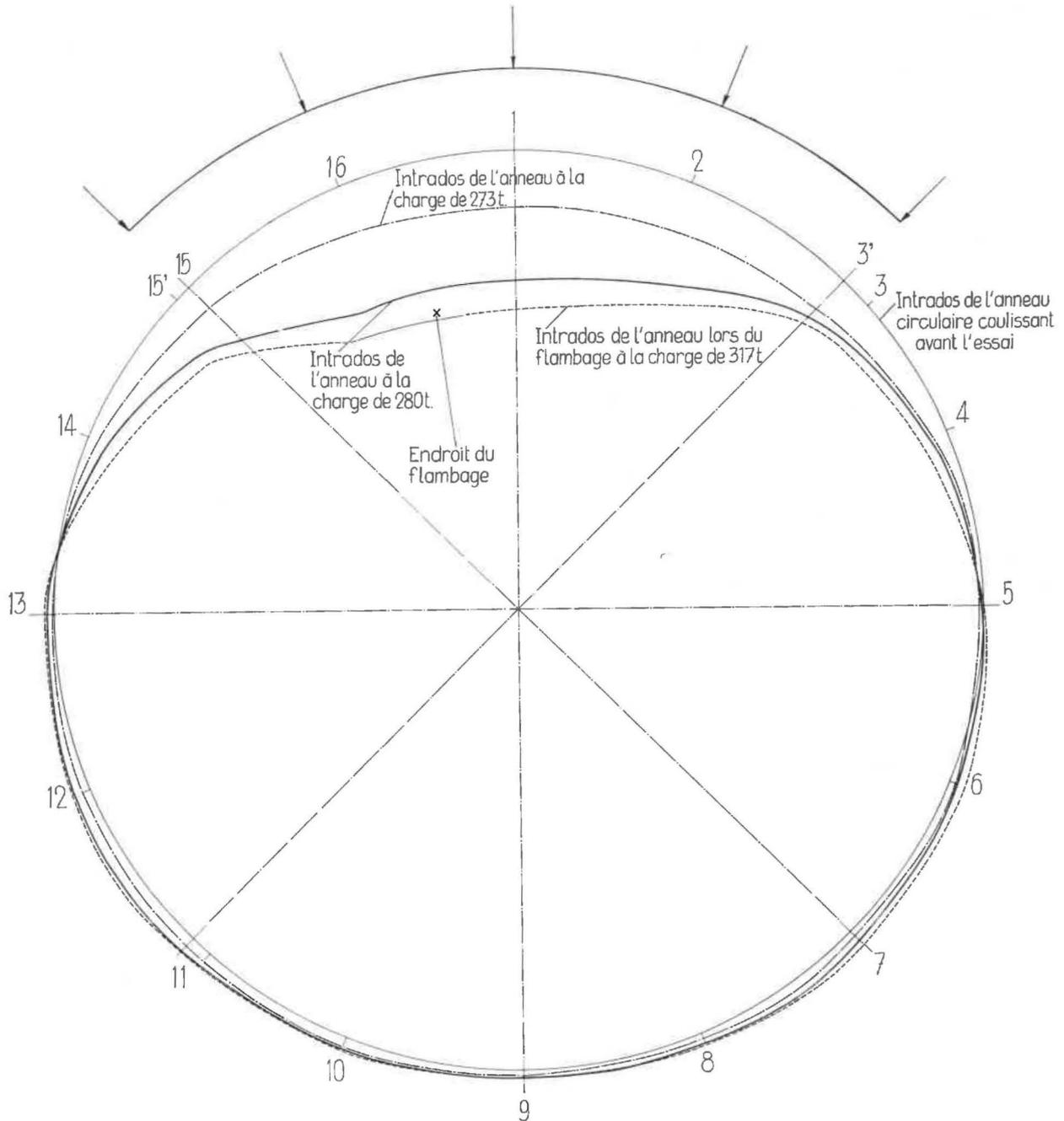


Fig. 59. — Déformation de l'anneau circulaire coulissant aux charges de 273 t, de 280 t et après flambage à la charge de 317 t. Le flambage s'est produit près de l'endroit indiqué par une croix.

Tous les « diamètres », sauf le 5, ont raccourci au cours de l'essai de 3 à 72 cm.

Avant l'essai, la section utile était de 14,52 m<sup>2</sup>.

A la charge de 273 t, elle est de 13,80 m<sup>2</sup>, ce qui correspond à une diminution de 5 % par rapport à la section initiale.

A la charge de 280 t, cette section est de 13,10 m<sup>2</sup>, soit une diminution de 9,8 %.

Au moment du flambage à la charge de 317 t, elle est de 12,78 m<sup>2</sup>, soit une diminution de 12 %.

#### 42. Flambage des cadres.

Le flambage a eu lieu à 280 t, mais après que la charge maximum eut atteint 317 t. Ce flambage s'est produit entre les points 1 et 16 à 48 cm de l'assemblage 15. Une croix indique cet emplacement à la figure 59.

La figure 60 montre l'anneau après la rupture par flambage ; on distingue bien à l'avant-plan l'endroit où le flambage s'est produit.

Les figures 61 et 62 montrent les déformations en gros plan. La figure 61 fait ressortir le brusque

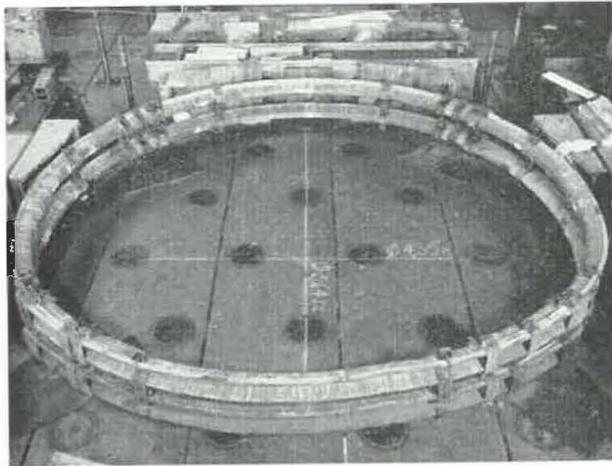


Fig. 60. — Photo prise après le flambage de l'anneau circulaire coulissant à la charge de 317 t. La charge a été appliquée à la partie de l'anneau située au bas de la photo et on aperçoit en bas à droite l'emplacement où le flambage s'est produit.



Fig. 61. — Photo montrant l'endroit où le flambage s'est produit. On constate le changement de courbure du cadre près de l'assemblage.

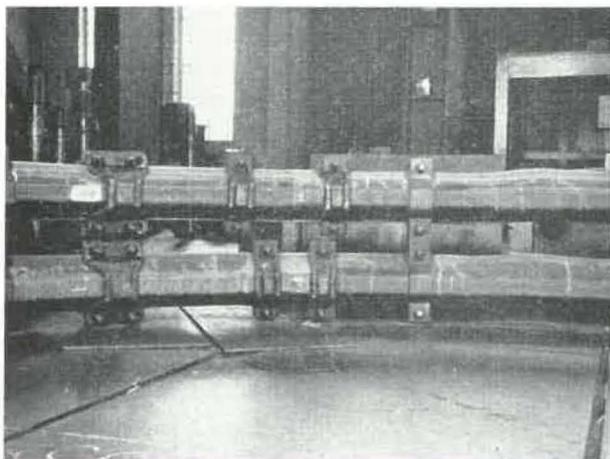


Fig. 62. — Photo montrant l'endroit où le flambage s'est produit.

changement de courbure qui a eu lieu à partir de l'assemblage.

#### 43. Variation des rayons de courbure.

A la fin de l'essai, les rayons de courbure avaient les valeurs suivantes aux divers endroits de l'anneau (le rayon de courbure était de 2,16 m avant l'essai) :

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| à l'emplacement 1 (fig. 59) | $R = 4,27$ m (près de l'endroit où s'est produit le flambage) |
| à l'emplacement 4           | $R = 1,52$ m  |
| à l'emplacement 5           | $R = 2,16$ m  |
| à l'emplacement 9           | $R = 3,32$ m  |
| à l'emplacement 13          | $R = 2,16$ m  |
| à l'emplacement 14          | $R = 1,68$ m  |

On constate que le flambage s'est produit près d'un endroit où le rayon de courbure était devenu très grand.

#### 44. Coulissement des éléments de cadres.

Le coulissement des éléments de cadres a eu lieu régulièrement tout au long de l'essai.

Le tableau XVI montre la valeur des divers coulissements en fonction de la charge appliquée pour chacun des 4 assemblages. Ces assemblages sont situés à hauteur des points 3, 7, 11 et 15 de la figure 59. Ce tableau donne pour chaque assemblage le coulissement qui s'est produit à la charge indiquée, ainsi que les coulissements cumulés. Il marque aussi l'effort avec lequel les boulons ont été serrés.

Tous les boulons ont été serrés à 38 kgm, puis resserrés une nouvelle fois avec ce même effort lors du premier coulissement avant d'être resserrés à 44 kgm.

Après chaque coulissement, la partie extérieure de l'anneau est recalée contre les appuis.

On constate que pratiquement seuls 2 assemblages diamétralement opposés ont coulissé.

A la fin de l'essai, le coulissement total est d'environ 90 cm, soit 6,5 % de la circonférence de l'anneau au début de l'essai.

#### 45. Variations des tensions dans l'acier des cadres.

Les tensions dans l'acier des éléments des cadres ont été mesurées en 37 points à l'aide de jauges de contraintes placées aux endroits indiqués sur les figures 63 et 64.

TABLEAU XVI.  
Coulissement des éléments des cadres en mm

| Serrage des boulons en kgm  | Charge en t                     | Coulissement des assemblages situés aux points |     |                  |   |                   |    |                   |     |
|---|---------------------------------|--|-----|------------------|---|-------------------|----|-------------------|-----|
|   |                                 | 3 coulis. cumulé                               |     | 7 coulis. cumulé |   | 11 coulis. cumulé |    | 15 coulis. cumulé |     |
| 38  | 148                             | 0  | 0   | 0                | 0 | 12                | 12 | 0                 | 0   |
| Les boulons de l'assemblage 11 ayant coulé ont été resserrés avec un effort de 38 kgm.  |                                 |  |     |                  |   |                   |    |                   |     |
| 38  | 144                             | 54   | 54  | 0                | 0 | 0                 | 12 | 0                 | 0   |
| Les boulons de l'assemblage 3, ayant coulé, ont été resserrés avec un effort de 38 kgm. |                                 |  |     |                  |   |                   |    |                   |     |
| 38  | 170<br>la charge retombe à 50 t | 0  | 54  | 0                | 0 | 0                 | 12 | 86                | 86  |
| Les boulons de l'assemblage 15, ayant coulé, sont resserrés avec un effort de 38 kgm.   |                                 |  |     |                  |   |                   |    |                   |     |
| 38  | 195<br>la charge retombe à 60 t | 96   | 150 | 0                | 0 | 0                 | 12 | 0                 | 86  |
| Tous les boulons sont resserrés avec un effort de 44 kgm.                               |                                 |  |     |                  |   |                   |    |                   |     |
| 44  | 273                             | 0  | 150 | 0                | 0 | 0                 | 12 | 129               | 215 |
| 44  | 255                             | 0  | 150 | 0                | 0 | 0                 | 12 | 59                | 274 |
| 44  | 282                             | 0  | 150 | 0                | 0 | 0                 | 12 | 86                | 360 |
| 44  | 265<br>charge retombée à 225 t  | 5  | 155 | 0                | 0 | 0                 | 12 | 0                 | 360 |
| 44  | 292<br>charge retombée à 85 t   | 68   | 223 | 0                | 0 | 0                 | 12 | 0                 | 360 |
| 44  | 317                             | 111  | 334 | 0                | 0 | 0                 | 12 | 0                 | 360 |
| 44  | 280                             | 113  | 447 | 0                | 0 | 0                 | 12 | 0                 | 360 |
| 44  | 280                             | 93   | 540 | 0                | 0 | 0                 | 12 | 0                 | 360 |

La figure 63 indique les emplacements des jauges sur le cadre supérieur et la figure 64 indique les emplacements des jauges sur le cadre inférieur. Suivant leurs positions par rapport au profil du cadre (fig. 46), les jauges ont été réparties dans les groupes suivants :

- a) jauges collées à la face intrados du cadre mesurant les tensions dans l'axe longitudinal du cadre (jauge a de la figure 46) : jauges 6, 10, 12, 13, 18, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37 de la fig. 63 ; jauges 24, 25, 26, 27, 28, 29 et 30 de la figure 64 ;
- b) jauges collées à la face intrados du cadre mesurant la tension dans le sens transversal du cadre (jauge b de la figure 46) : jauges 3, 4, 9, 11, 16, 19 et 23 de la fig. 63 ;

c) jauges collées sur le flanc du cadre mesurant les tensions dans l'axe longitudinal des cadres (jauge c de la fig. 46) : jauges 2, 8, 15, 17 et 22 de la fig. 63 ;

d) jauges collées sur la face centrale du cadre mais à l'intérieur de celui-ci mesurant la tension dans l'axe longitudinal des cadres (jauge d de la fig. 46) : jauges 1, 5, 7, 14, 20 et 21 de la fig. 63.

Les graphiques des figures 65 à 69 montrent les variations des contraintes en fonction de la charge appliquée.

Les valeurs données par les jauges utilisées ne sont plus exactes dès que la contrainte dépasse 50 kg/mm<sup>2</sup> (limite d'élasticité de l'acier des cadres 55 à 58 kg/mm<sup>2</sup>).

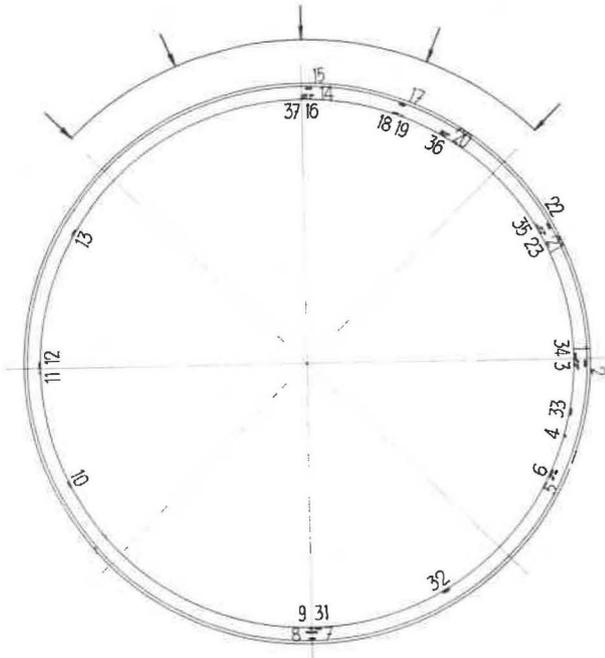


Fig. 63. — Emplacement des 30 jauges de contrainte utilisées pour mesurer les tensions dans l'acier du cadre supérieur de l'anneau circulaire coulissant.

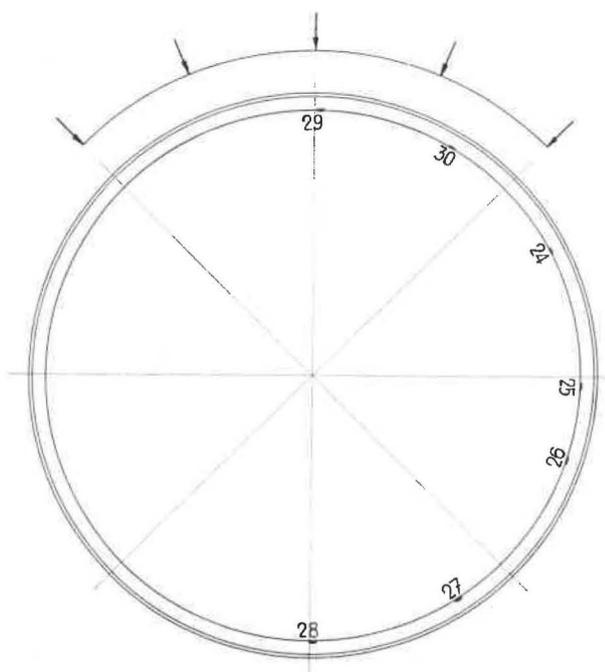


Fig. 64. — Emplacement des 7 jauges de contraintes réparties sur le cadre inférieur.

Une contrainte de  $10 \text{ kg/mm}^2$  a été atteinte à une charge de 25 t à la jauge 37.

Une contrainte de  $20 \text{ kg/mm}^2$  a été atteinte à une charge de 68 t à la jauge 35. A la charge de 80 t, les 3 jauges 13, 35 et 37 subissent une contrainte supérieure à  $20 \text{ kg/mm}^2$ , les contraintes étant de traction à la jauge 37, et de compression pour les 2 autres.

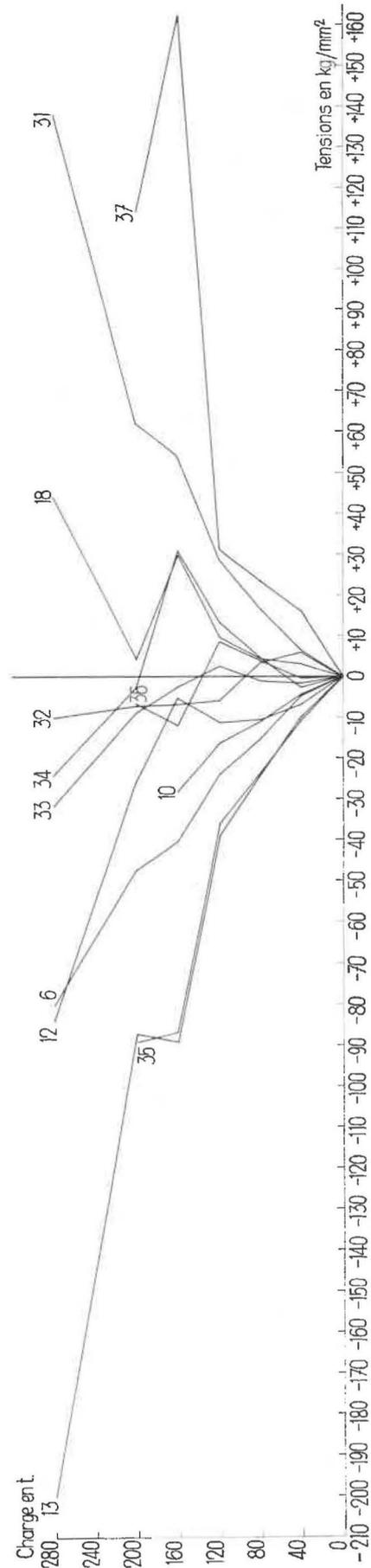


Fig. 65. — Variations des tensions dans l'acier en fonction de la charge appliquée pour les 12 jauges « a » du cadre supérieur.

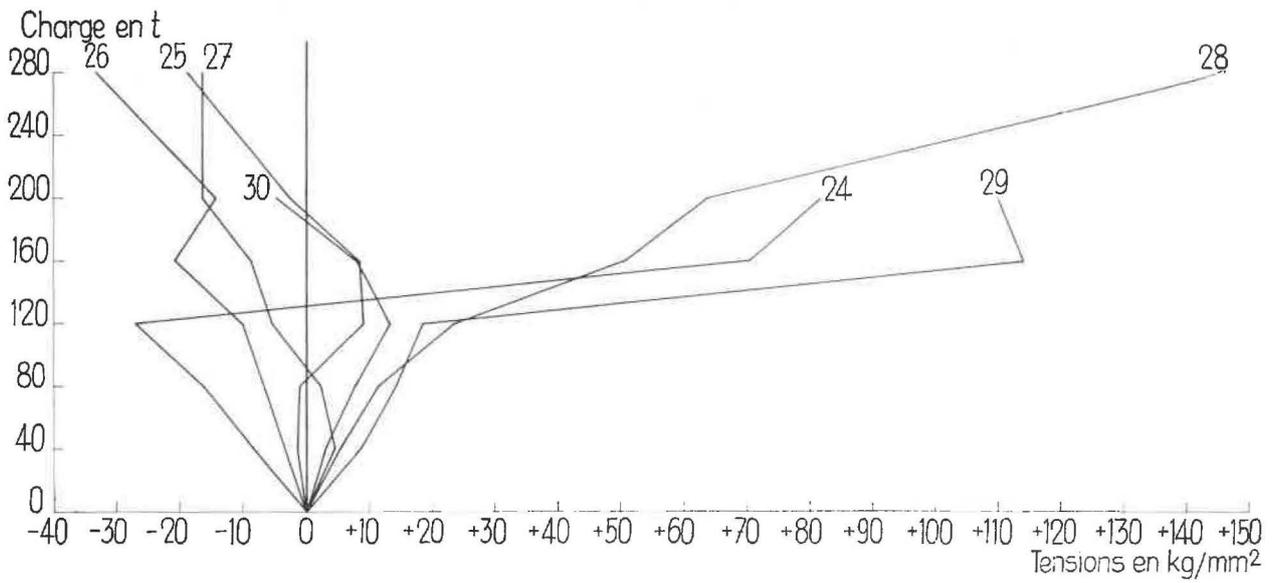


Fig. 66. — Variation des tensions dans l'acier en fonction de la charge appliquée pour les 7 jauges « a » du cadre inférieur.

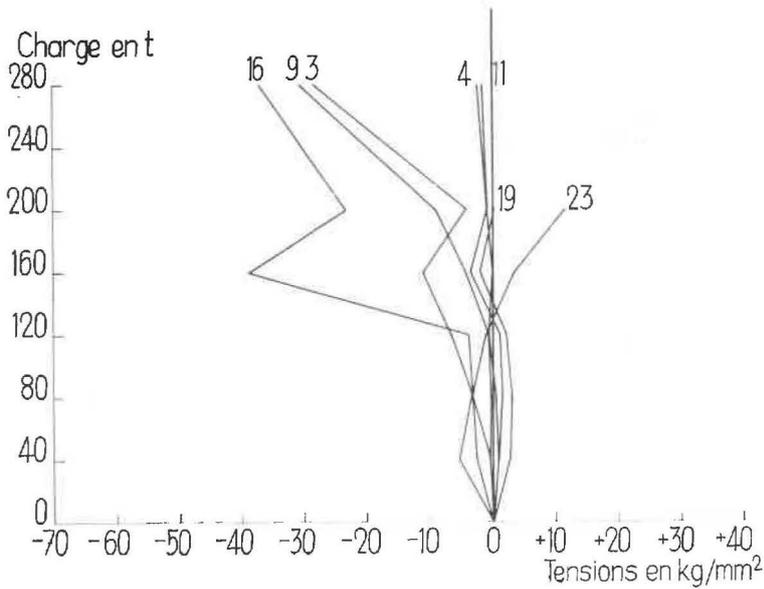


Fig. 67. — Variation des tensions dans l'acier en fonction de la charge appliquée pour les 7 jauges « b » du cadre supérieur.

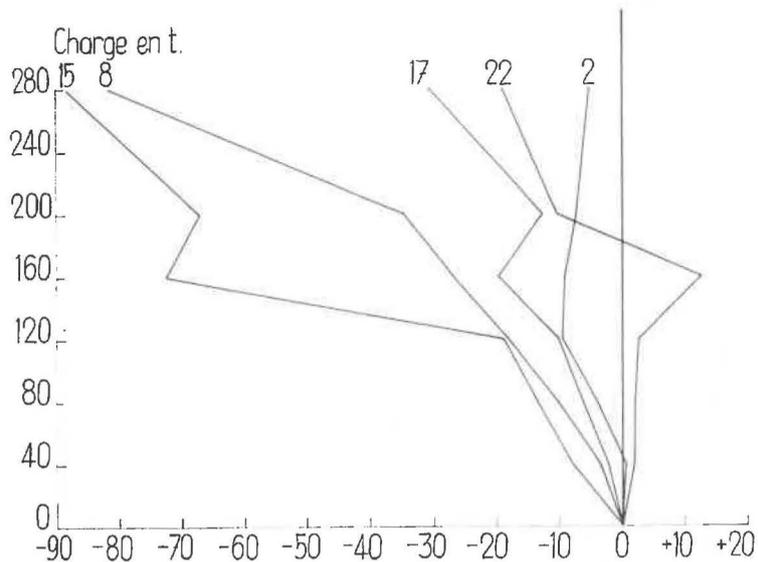


Fig. 68. — Variation des tensions dans l'acier en fonction de la charge appliquée pour les 5 jauges « c » du cadre supérieur.

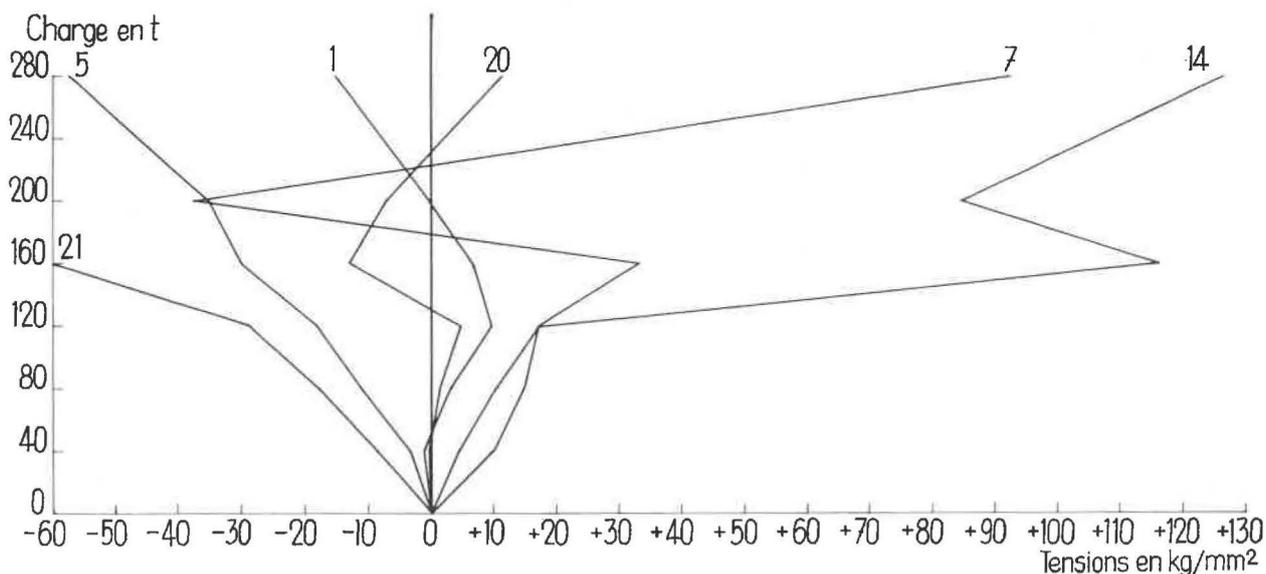


Fig. 69. — Variation des tensions dans l'acier en fonction de la charge appliquée pour les 6 jauges « d » du cadre supérieur.

Une contrainte de 50 kg/mm<sup>2</sup> a été atteinte à une charge de 130 t à la jauge 37.

A la charge de 280 t, 16 des 37 jauges ont subi une contrainte supérieure à 50 kg/mm<sup>2</sup>.

La figure 70 indique les variations des tensions tangentielle dans l'acier des cadres circulaires coulissants, mesurées au moyen des jauges collées sur la face intrados des cadres suivant leur axe longitudinal (jauge « a » de la figure 46) pour différentes charges.

On constate aussi une symétrie assez parfaite des tensions dans l'acier par rapport à l'axe des charges appliquées et à la direction perpendiculaire.

**46. Charges reprises par les vérins-dynamomètres.**

Le tableau XVII donne les réactions reprises par les deux vérins-dynamomètres en fonction de la charge appliquée sur le quart de l'anneau opposé.

TABLEAU XVII.

Charges reprises par les vérins-dynamomètres.

| Charge totale en t | Charge reprise par les vérins-dynamomètres en t | Pourcentage de charge transmise aux vérins-dynamomètres en % | Différence entre les charges transmises et reprises en t |
|--------------------|---|--|--|
| 80                 | 42  | 53   | 38   |
| 120                | 70  | 58   | 50   |
| 160                | 112   | 70   | 48   |
| 200                | 120   | 60   | 80   |
| 280                | 178   | 64   | 102  |

**5. ESSAI SUR L'ANNEAU ELLIPTIQUE COULISSANT (essai 3).**

La figure 71 montre l'installation du matériel lors de l'essai effectué sur un anneau constitué de 2 cadres elliptiques coulissants, placés à une distance de 27,5 m d'axe en axe.

La longueur du grand axe est de 4,290 mesuré à l'intrados et de 4,566 mesuré à l'extrados. La longueur du petit axe est de 3,780 m mesuré à l'intrados et de 4,056 mesuré à l'extrados.

Les deux cadres sont solidarités entre eux par 8 entretoises.

Les essais ont été effectués en exerçant la poussée sur un des deux quarts d'anneau situé à une extrémité du grand axe, c'est-à-dire sur des éléments du cadre ayant un petit rayon de courbure.

On remarque sur la figure 71 que l'élément de cadre sollicité est situé à l'extrados des 2 éléments voisins, le grand carcan étant disposé du côté de l'élément à grand rayon de courbure.

Le serrage des boulons des carcans a été effectué avec une clef dynamométrique réglée au début des essais à 40 kgm.

Le premier coulissement d'un assemblage serré à 40 kgm s'est produit à la charge de 180 t.

Après le premier coulissement à chacun des assemblages, tous les boulons ont été ensuite resserrés à 44 kgm. Après cela, un premier coulissement s'est produit à la charge de 240 t.

Les boulons ont alors été à nouveau resserrés à 44 kgm et on a pu pousser la charge jusqu'à 340 t. A partir de cette charge, les coulissements ne se produisent plus par chocs comme au début, mais

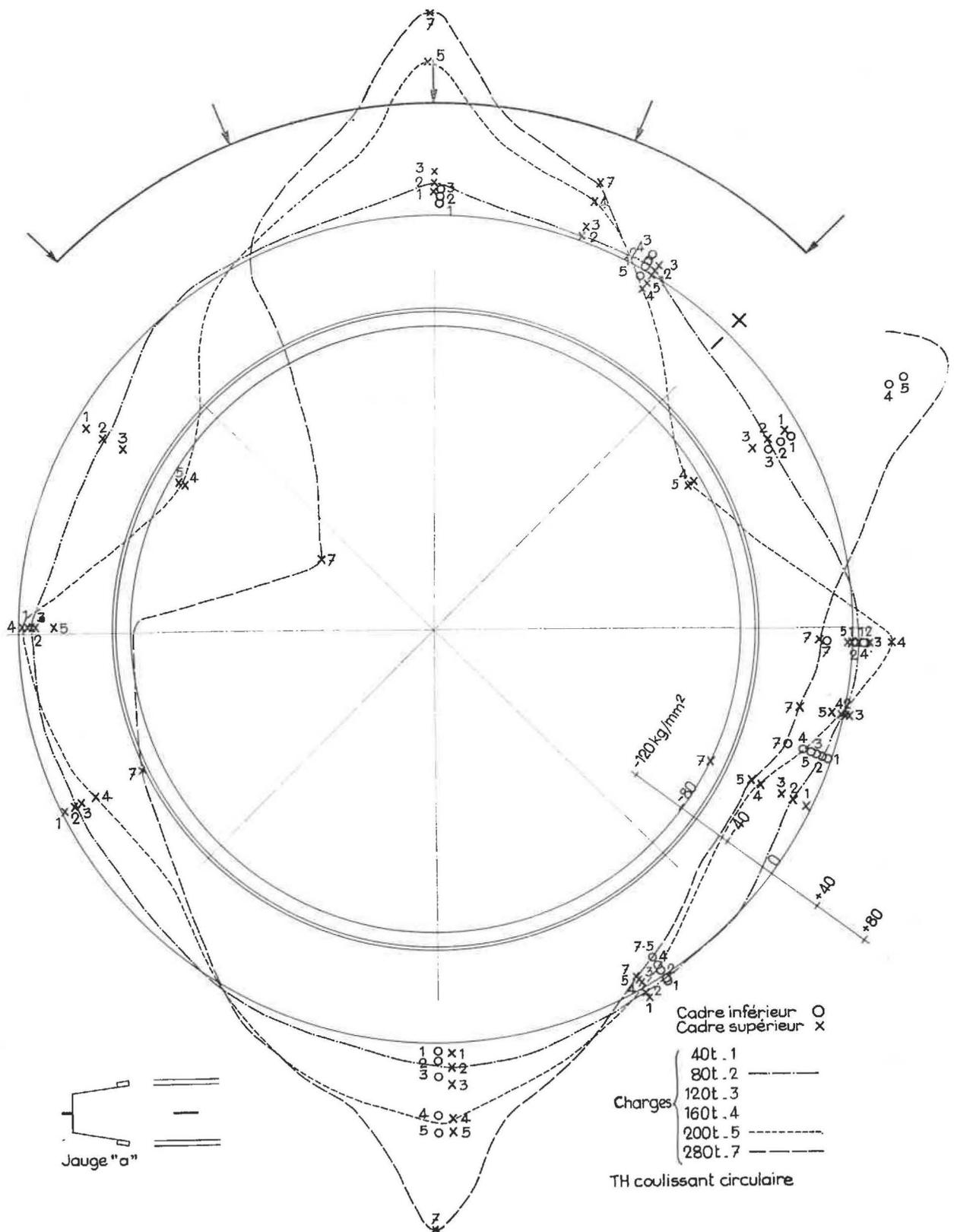


Fig. 70. — Variation des tensions dans l'acier de l'anneau circulaire coulissant mesurées au moyen des jauges collées sur la face intrados des cadres suivant l'axe longitudinal des cadres (jauge « a ») pour différentes charges (échelle des tensions : 1 cm = 40 kg/mm<sup>2</sup>).

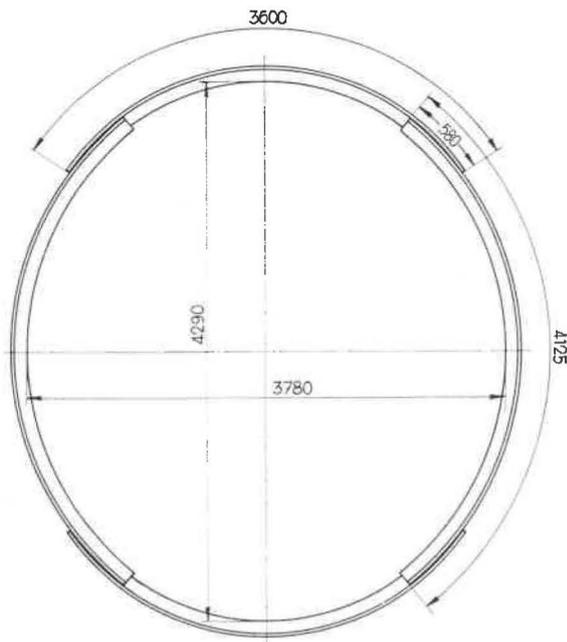


Fig. 71. — Dimensions des cadres elliptiques coulissants sur lesquels les essais ont été effectués.

ont lieu très régulièrement avec une amplitude limitée à quelques dixièmes de mm.

La charge maximum atteinte au cours de l'essai a été de 392 t, mais on n'a pas pu obtenir le flambage des cadres.

L'essai a ensuite pu être poursuivi à une charge plus ou moins constante d'environ 340 t jusqu'à la réalisation d'un anneau circulaire de 3,77 m de diamètre.

**51. Déformation de l'anneau elliptique coulissant.**

La figure 72 montre la déformation de l'anneau aux charges suivantes :

- a) à la charge de 240 t après les premiers coulissements des boulons serrés avec un effort de 40 kgm ;
- b) à la charge de 280 t après le premier coulissement des boulons serrés avec un effort de 44 kgm ;
- c) à la charge maximum de 392 t ;
- d) à la charge de 340 t après de très nombreux coulissements ;
- e) à la charge de 342 t peu avant d'obtenir un anneau circulaire.

Le tableau XVIII donne les variations des axes intérieurs numérotés 1 à 8 sur la figure 58.

La figure 73 montre l'anneau elliptique à la fin de l'essai, lorsqu'il est devenu à peu près circulaire.

Tous les 8 axes ont raccourci au cours de l'essai de 1 à 52 cm.

A la fin de l'essai, l'axe parallèle à la direction des efforts est passé de 4,29 à 3,77 m et l'axe perpendiculaire de 3,78 à 3,77 m.

Le tableau XIX montre les variations de la section utile en fonction de la charge.

**TABLEAU XIX.**  
Variations de la section utile.

| Charge en t          | Section utile en m <sup>2</sup> | Diminution de la section utile en % |
|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 0                    | 12,56                           | —                                   |
| 240                  | 12,44                           | 1                                   |
| 280                  | 12,27                           | 2,3                                 |
| 392                  | 11,99                           | 4,5                                 |
| 340                  | 11,65                           | 7,3                                 |
| fin de l'essai à 342 | 11,38                           | 9,4                                 |

**TABLEAU XVIII.**  
Variations des « axes » de l'anneau elliptique coulissant.  
axes en mm

| Charge en t | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0           | 4,290 | 4,240 | 4,005 | 3,845 | 3,780 | 3,855 | 4,015 | 4,250 |
| 80          | 4,280 | 4,245 | 3,995 | 3,860 | 3,795 | 3,855 | 4,030 | 4,235 |
| 120         | 4,270 | 4,240 | 3,985 | 3,855 | 3,800 | 3,865 | 4,035 | 4,230 |
| 160         | 4,260 | 4,235 | 3,985 | 3,865 | 3,800 | 3,875 | 4,020 | 4,225 |
| 200         | 4,240 | 4,220 | 3,985 | 3,875 | 3,800 | 3,870 | 4,020 | 4,200 |
| 240         | 4,205 | 4,185 | 3,965 | 3,865 | 3,800 | 3,865 | 3,980 | 4,175 |
| 280         | 4,130 | 4,150 | 3,945 | 3,855 | 3,805 | 3,865 | 3,935 | 4,115 |
| 392         | 4,085 | 4,095 | 3,905 | 3,835 | 3,780 | 3,825 | 3,880 | 4,070 |
| 340         | 3,927 | 3,950 | 3,785 | 3,810 | 3,790 | 3,830 | 3,825 | 3,890 |
| 342         | 3,825 | —     | —     | 3,790 | 3,795 | 3,825 | —     | 3,815 |
| 336         | 3,770 | 3,770 | 3,775 | 3,775 | 3,770 | 3,770 | 3,770 | 3,775 |

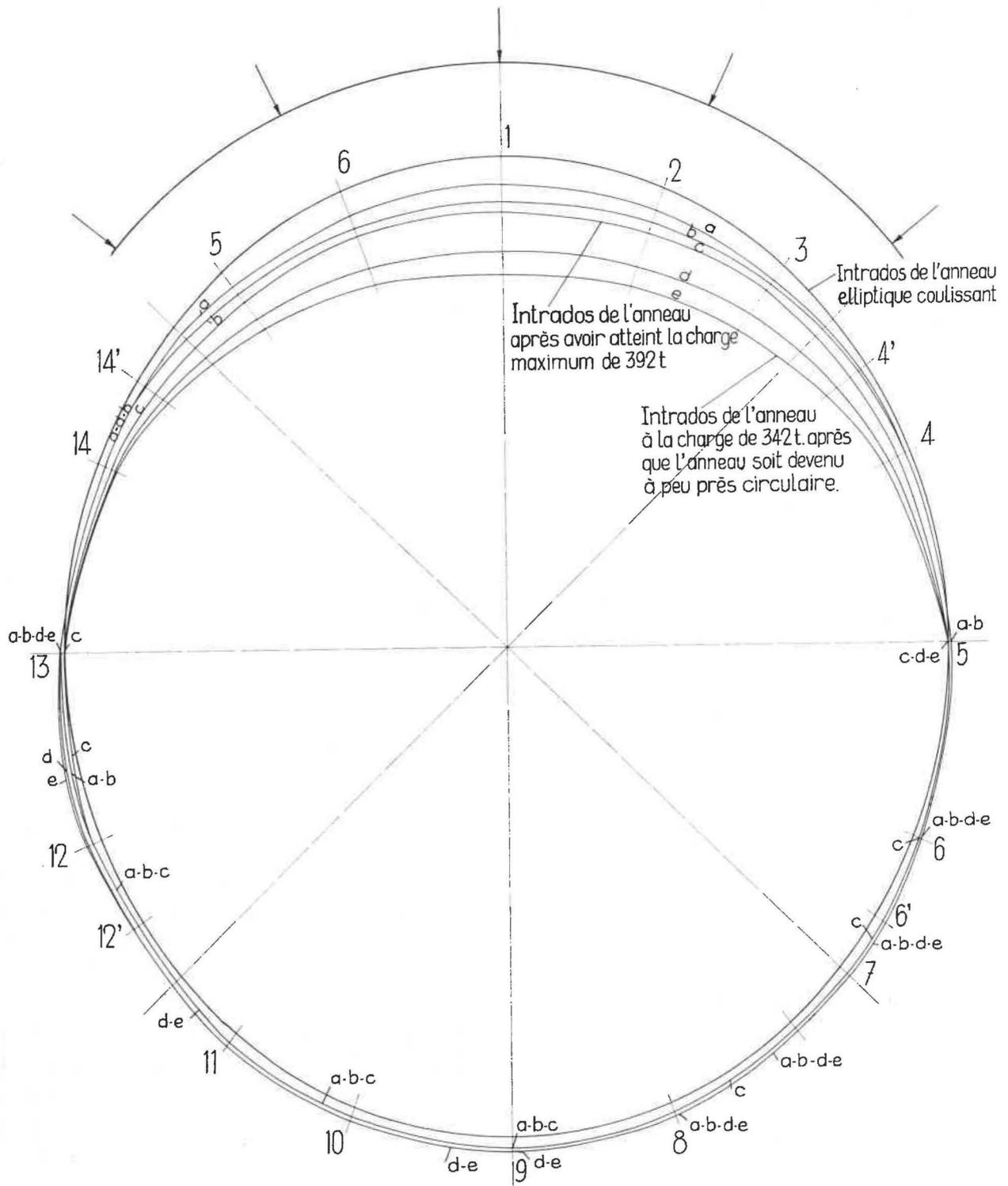


Fig. 72. — Déformations de l'anneau elliptique coulissant aux charges suivantes :

courbe a : charge de 240 t  
 courbe b : charge de 280 t  
 courbe c : charge maximum de 392 t  
 courbe d : charge de 340 t  
 courbe e : charge de 342 t ; à ce moment l'anneau coulissant était devenu à peu près circulaire.

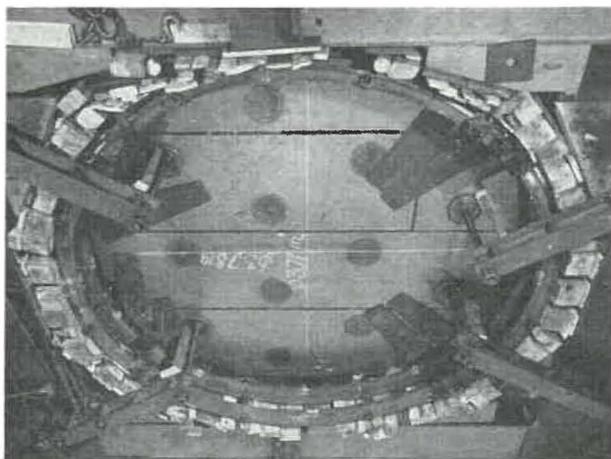


Fig. 73. — Photo montrant l'anneau elliptique devenu circulaire après avoir atteint une charge maximum de 392 t.

**52. Flambage des cadres.**

On n'a pas réussi au cours de cet essai à atteindre la limite de flambage de l'anneau elliptique.

Au cours de l'essai du cadre elliptique coulissant, l'écartement extérieur maximum des lèvres du profil des cadres est passé de 169 à 180 mm en un seul endroit situé sur l'élément d du cadre supérieur près du point de mesure 14.

Sur les autres éléments de cadres, l'écartement maximum des lèvres a été de 175 mm.

**53. Variation des rayons de courbure.**

Vers la fin de l'essai, les rayons de courbure des divers éléments de cadre se rapprochent d'une valeur commune, comme le montre le tableau XX qui donne la valeur de quelques rayons de courbure à divers points de l'anneau (fig. 72).

TABLEAU XX.

Valeurs de quelques rayons de courbure aux divers emplacements repérés sur la figure 72.

| Emplacement | Rayon de courbure en m                  |  |
|-------------|---|--|
|             | courbe d (fig. 72)<br>(charge de 340 t) | courbe e (fig. 72)<br>(charge de 342 t<br>vers la fin<br>de l'essai) |
| 1           | 2,30                                    | 2,47   |
| 4           | —                                       | 1,62   |
| 5           | 2,10                                    | 2,05   |
| 6           | —                                       | 2,15   |
| 9           | 1,80                                    | 2,15   |
| 12          | 2,30                                    | 2,30   |
| 13          | 2,15                                    | 2,30   |
| 14          | 1,78                                    | —  |
| 16          | 2,15                                    | —  |

**54. Coulissement des éléments de cadres.**

Le coulissement des éléments de cadres a eu lieu régulièrement tout au long de l'essai. Le premier coulissement s'est produit à la charge de 180 t à l'assemblage situé près du point 3.

Le tableau XXI montre la valeur des divers coulissements en fonction de la charge appliquée pour chacun des 4 assemblages. Ces assemblages sont situés à hauteur des points 3, 7, 11 et 15 de la figure 72.

Ce tableau donne pour chaque assemblage le coulissement qui s'est produit à la charge indiquée, ainsi que les coulissements cumulés, et indique aussi l'effort avec lequel les boulons ont été serrés.

Tous les boulons ont été serrés au départ à 40 kgm, puis resserrés une nouvelle fois avec le même effort avant d'être resserrés tous à 44 kgm.

On constate qu'après avoir atteint la charge maximum de 392 t, la charge se maintient entre 290 t et 342 t avec des coulissements se produisant principalement aux carcans 3 et 11.

Le coulissement au carcan 3 a été facilité, vers la fin de l'essai, par suite d'une déchirure de l'extrémité de l'élément du cadre situé à l'intrados (fig. 74). Un trou de 20 mm de diamètre avait été foré à l'usine, à 20 cm de l'extrémité du cadre. A la charge de 352 t, une déchirure s'est produite entre ce trou et l'extrémité de l'élément de cadre. A la charge de 392 t, cette déchirure dépassait le trou de 12 cm. Comme on le voit sur la figure 74, la distance entre les lèvres de cette déchirure était de 7 mm.



Fig. 74. — Photo montrant la déchirure à l'intrados d'un élément de cadre qui a eu pour conséquence de faciliter le chevauchement d'un élément de cadre sur l'autre.

A cette charge de 392 t, une déchirure de même genre s'est produite aussi à un élément de cadre situé à hauteur du point 11.

On constate que, de même qu'à l'essai sur l'anneau circulaire coulissant, seuls 2 carcans diamétralement opposés ont coulissé.

TABLEAU XXI.

Coulissement des éléments des cadres en mm.

| Serrage<br>des boulons<br>en kgm   | Charge<br>en t | Coulissement des 4 assemblages aux points : |     |             |    |              |     |              |    |
|--|----------------|---|-----|-------------|----|--------------|-----|--------------|----|
|  |                | 3<br>cumulé                                 |     | 7<br>cumulé |    | 11<br>cumulé |     | 15<br>cumulé |    |
| 40   | 180            | 43  | 43  | 0           | 0  | 0            | 0   | 0            | 0  |
| Les boulons de l'assemblage 3, ayant coulissé, sont resserrés avec un effort de 44 kgm.  |                |   |     |             |    |              |     |              |    |
| 40<br>(carcans 7, 11, 15)  | 230            |   |     | 0           | 0  | 0            | 0   | 22           | 22 |
| 44<br>(carcan 3)   |                | 0   | 43  |             |    |              |     |              |    |
| Les boulons de l'assemblage 15, ayant coulissé, sont resserrés avec un effort de 44 kgm.   |                |   |     |             |    |              |     |              |    |
| 40<br>(carcans 7, 11)  | 276            |   |     | 33          | 33 | 15           | 15  |              |    |
| 44<br>(carcans 3, 15)  |                | 57  | 100 |             |    |              |     | 22           | 22 |
| Les boulons des assemblages 7 et 11, ayant coulissé, sont resserrés à leur tour avec un effort de 44 kgm, tandis que les boulons des assemblages 3 et 15 sont encore resserrés à 44 kgm. A partir de la charge de 340 t, il se produit de petits coulissements très limités, la charge variant entre 340 et 392 t. |                |   |     |             |    |              |     |              |    |
| 44   | 340 à 392      | 205   | 305 | 2           | 35 | 12           | 27  | 13           | 35 |
| Les boulons de l'assemblage 3 sont resserrés encore une fois avec un effort de 44 kgm.   |                |   |     |             |    |              |     |              |    |
| 44   | 320 à 352      | 15  | 320 | 0           | 35 | 101          | 128 | 0            | 35 |
| 44   | 340            | 46  | 366 | 0           | 35 | 30           | 158 | 48           | 83 |
| 44   | 342            | 25  | 391 | 0           | 35 | 26           | 184 | 0            | 83 |
| 44   | 290            | 69  | 460 | 0           | 35 | 0            | 184 | 0            | 83 |
| 44   | 342            | 10  | 470 | 0           | 35 | 24           | 208 | 0            | 83 |
| 44   | 336            | 20  | 490 | 0           | 35 | 0            | 258 | 0            | 83 |

Le coulissement cumulé final des 2 assemblages 3 et 7 situés d'un côté de l'axe de la charge est de 525 mm, tandis que le coulissement total des 2 autres assemblages est de 341 mm.

A la charge maximum de 392 t, le coulissement total aux 4 éclisses est de 402 mm pour une circonférence de 13,21 m avant l'essai, soit un coulissement de 3 % environ.

A la fin de l'essai, le coulissement total est de 866 mm.

#### 55. Comportement des carcans.

Au début du coulissement, les 2 carcans extérieurs de chaque assemblage sont entraînés par l'élément de cadre à l'extrémité duquel ils sont fixés. Cet entraînement est facilité par un petit doigt métallique fixé au carcan et entraîné par l'élément coulissant.

Vers la fin de l'essai, ce doigt est souvent arraché sous l'effet du frottement.

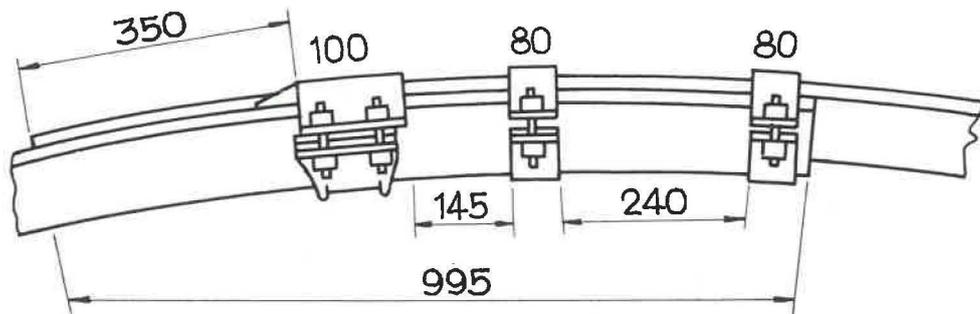


Fig. 75. — Position respective des 3 carcans d'un assemblage après un coulisement de 490 mm.

La figure 75 montre la position des carcans à l'assemblage peu avant la fin de l'essai.

**56. Variations des tensions dans l'acier des cadres.**

Les tensions dans l'acier constituant les éléments des cadres ont été mesurées en 28 points à l'aide de jauges de contraintes placées aux endroits indiqués sur les figures 76 et 77.

La figure 76 indique les emplacements des jauges sur le cadre supérieur et la figure 77 indique les emplacements des jauges sur le cadre inférieur. Suivant leur position par rapport au profil du cadre

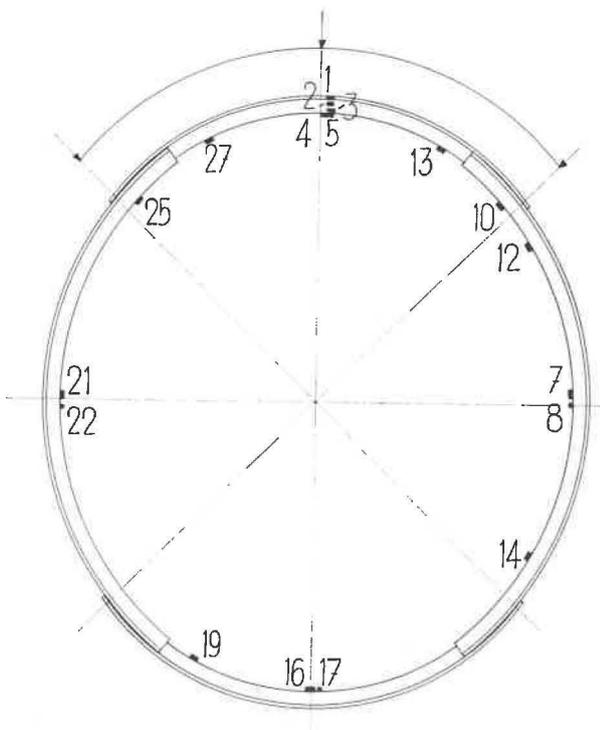


Fig. 76. — Emplacement des 18 jauges de contraintes utilisées pour mesurer les tensions dans l'acier du cadre supérieur de l'anneau elliptique coulissant.

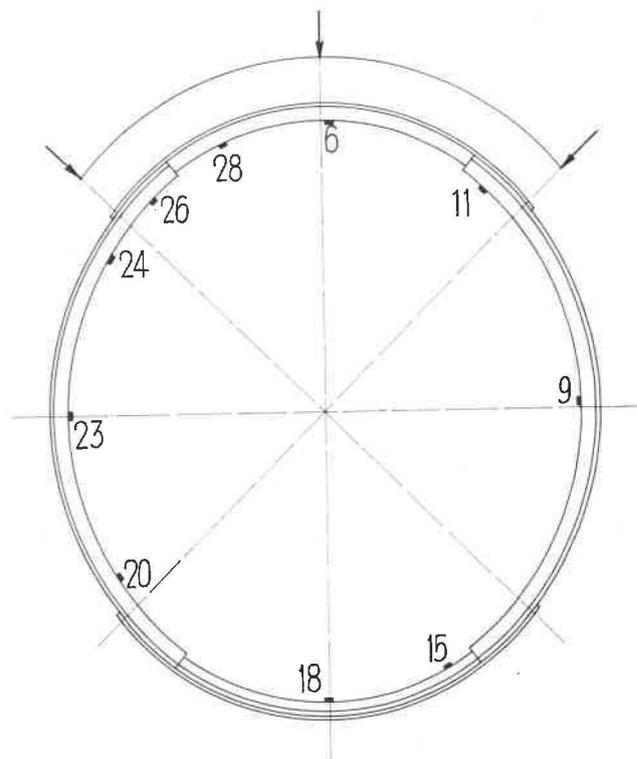


Fig. 77. — Emplacement des 10 jauges de contrainte réparties sur le cadre inférieur.

(fig. 46), les jauges ont été réparties dans les groupes suivants :

- a) jauges collées à la face intrados du cadre mesurant les tensions dans l'axe longitudinal du cadre (jauge a de la fig. 46) : jauges 4, 7, 10, 12, 13, 14, 16, 19, 21, 25 et 27 de la fig. 76 ; jauges 6, 9, 11, 15, 18, 20, 23, 24, 26 et 28 de la figure 77 ;
- b) jauges collées à la face intrados du cadre mesurant la tension dans le sens transversal du cadre (jauge b de la fig. 46) : jauges 5, 8, 17 et 22 de la figure 76 ;
- c) jauges collées sur le flanc de cadre mesurant les tensions dans l'axe longitudinal des cadres (jau-

ges c et e de la fig. 46) : jauges 1 et 2 de la figure 76 ;  
 d) jauges collées sur la face centrale du cadre mais à l'intérieur de celui-ci mesurant la tension dans l'axe longitudinal du cadre (jauge d de la fig. 46) : jauge 3 de la figure 76.

Les graphiques des figures 78 à 81 montrent les variations des contraintes en fonction de la charge appliquée.

Les valeurs données par les jauges utilisées ne sont plus exactes dès que la contrainte dépasse 50 kg/mm<sup>2</sup> (limite d'élasticité de l'acier des cadres : 55 à 58 kg/mm<sup>2</sup>).

La figure 82 indique les variations des tensions tangentielles de l'acier des cadres elliptiques coulissants mesurées au moyen des jauges collées sur la face intrados des cadres suivant leur axe longitudinal (jauge « a » de la fig. 46) pour différentes charges.

On constate aussi une symétrie assez parfaite des tensions dans l'acier par rapport à l'axe des charges appliquées et à la direction perpendiculaire à celui-ci.

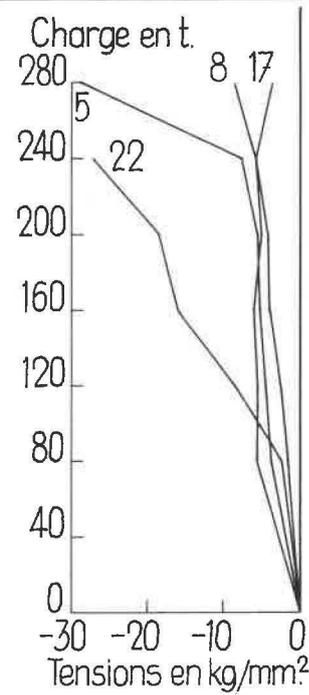


Fig. 80. — Variations des tensions dans l'acier en fonction de la charge appliquée pour les 4 jauges « b » du cadre supérieur.

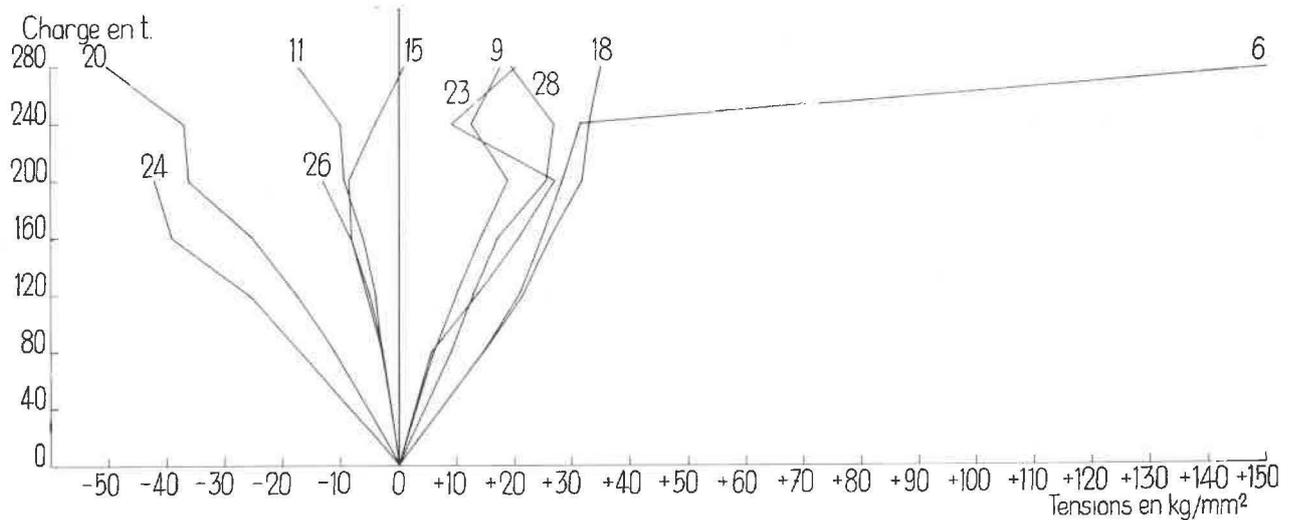


Fig. 78. — Variations des tensions dans l'acier en fonction de la charge appliquée pour les 11 jauges « a » du cadre supérieur.

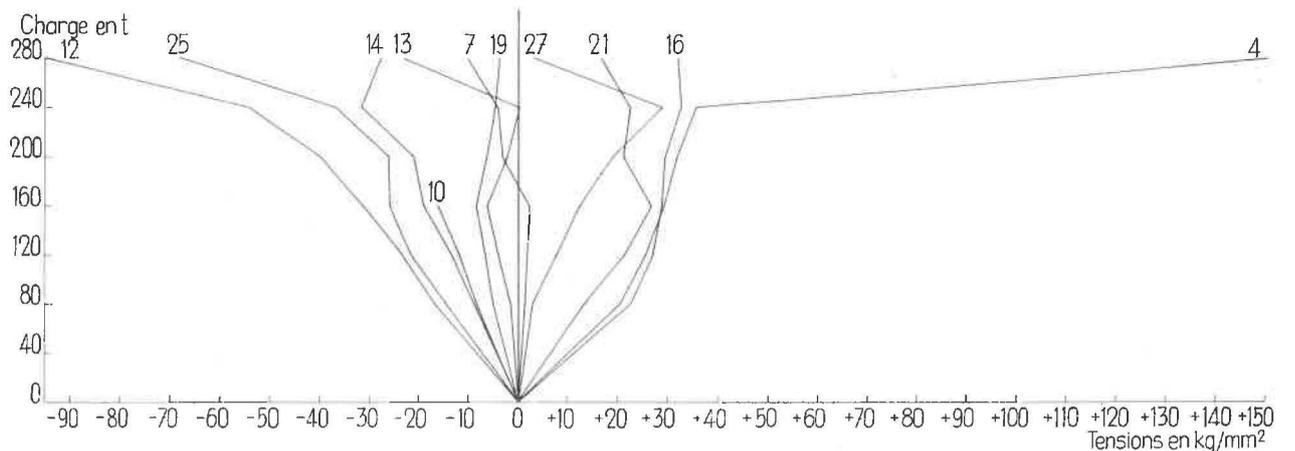


Fig. 79. — Variations des tensions dans l'acier en fonction de la charge appliquée pour les 10 jauges « a » du cadre inférieur.

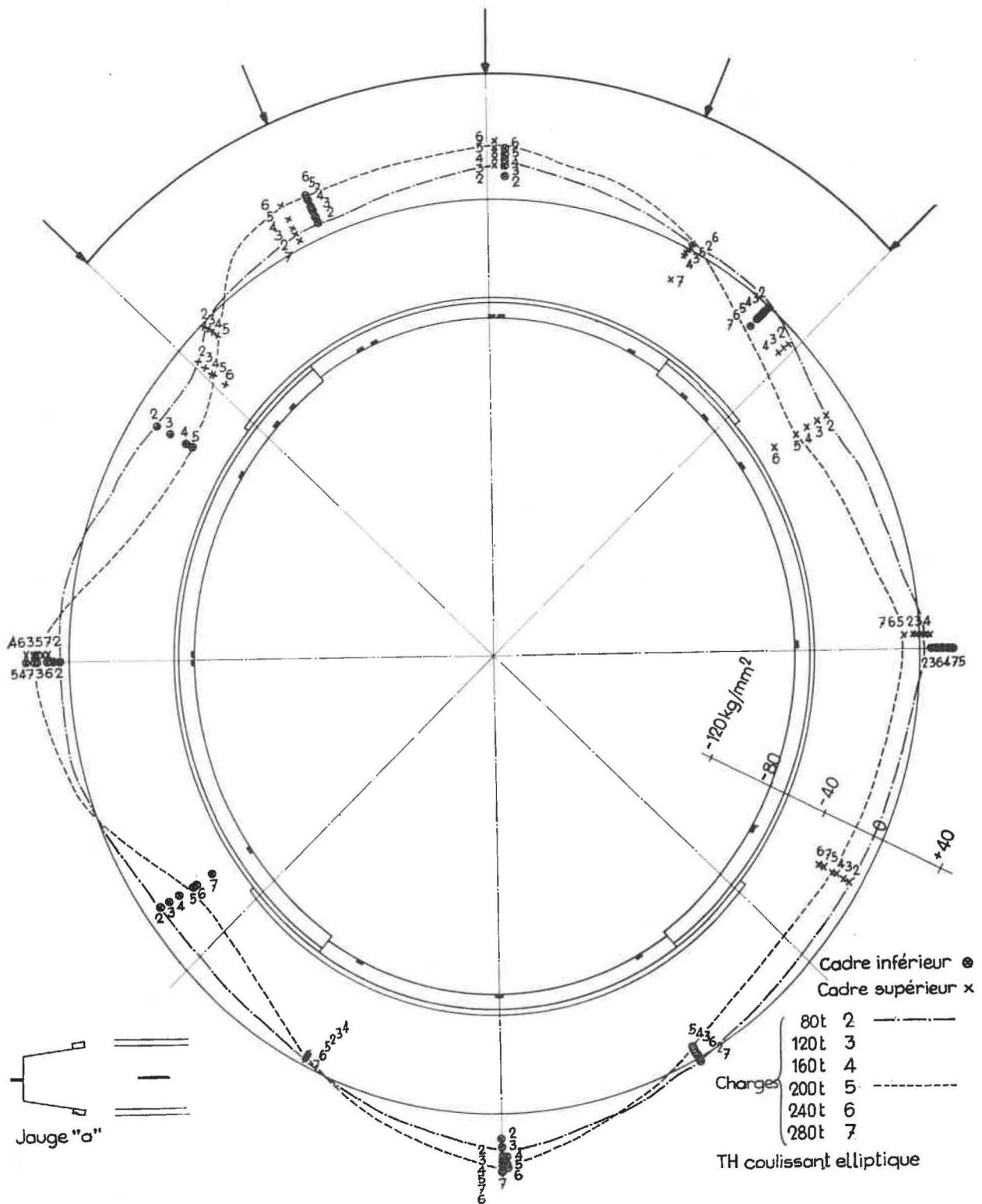


Fig. 82. — Variations des tensions dans l'acier de l'anneau elliptique couissant mesurées au moyen des jauges collées sur la face intrados des cadres suivant l'axe longitudinal des cadres (jauge « a ») pour différentes charges (échelle des tensions : 1 cm = 40 kg/mm<sup>2</sup>).

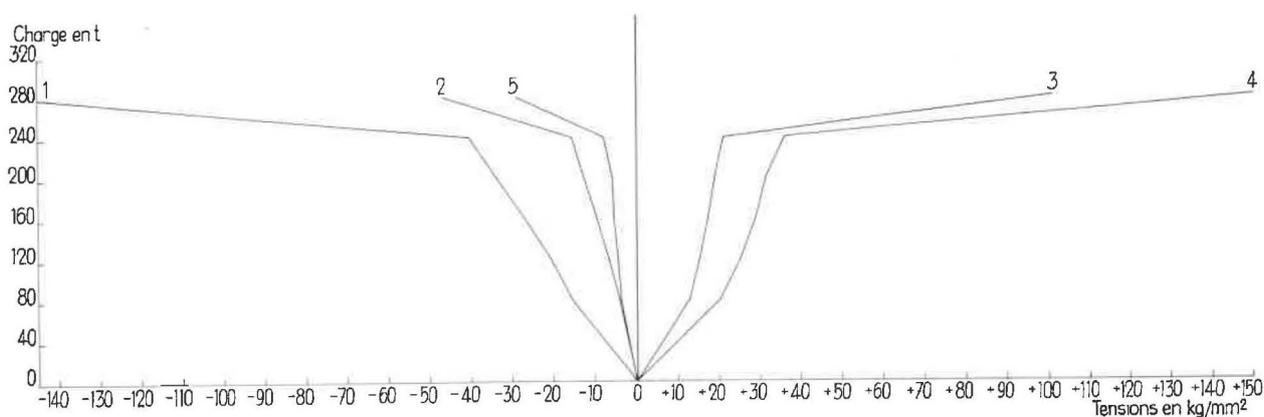


Fig. 81. — Variations des tensions dans l'acier en fonction de la charge appliquée pour les 5 jauges 1 à 5 placées sur le cadre supérieur au centre de la partie chargée.

### 57. Charges reprises par les vérins-dynamomètres.

Le tableau XXII donne les réactions reprises par les deux vérins-dynamomètres en fonction de la charge appliquée sur le quart de l'anneau opposé.

On constate encore ici, ainsi qu'à tous les essais précédents sur les cadres Rheinstahl-Wanheim et Toussaint-Heintzmann, qu'à partir d'une charge de 120 t, le rapport entre la charge reprise par les 2 vérins-dynamomètres et la charge exercée est compris entre 60 et 70 %.

TABLEAU XXII.  
Charges reprises par les vérins-dynamomètres.

| Charge totale en t | Charge reprise par les vérins-dynamomètres en t | Pourcentage de charge transmise aux vérins-dynamomètres en % | Différence entre les charges transmises et reprises en t |
|--------------------|---|--|--|
| 80                 | 46  | 57   | 34   |
| 120                | 74  | 62   | 46   |
| 160                | 108   | 68   | 52   |
| 200                | 136   | 68   | 64   |
| 240                | 170   | 71   | 70   |
| 280                | 183   | 65   | 97   |

## C. — COMPARAISON ENTRE LES DIVERS RESULTATS DES ESSAIS

Le tableau XXIII résume les résultats des divers essais.

### 1. COMPARAISON ENTRE LES DEUX ESSAIS DE CADRES RHEINSTAHL-WANHEIM

Rappelons que les deux essais sur cadres Rheinstahl-Wanheim ont été effectués l'un sur un anneau rigide et l'autre sur un anneau rigide entouré d'un anneau coulissant. Le diamètre de l'anneau rigide est le même dans les deux cas.

#### 11. Charges maxima.

Le flambage de l'anneau simple rigide s'est produit à une charge de 298 t et celui de l'anneau double à 280 t.

Le flambage de l'anneau rigide s'est produit dans les deux cas en des points situés sur des rayons faisant un angle de 45° par rapport à la direction des efforts, mais dans le cas de l'anneau simple, le flambage a eu lieu du côté de la charge, tandis que dans

le cas de l'anneau double le flambage a eu lieu du côté opposé.

#### 12. Déformation des anneaux.

On constate aussi que, pour des charges identiques, la déformation de l'anneau rigide est beaucoup plus petite quand il est seul que quand il est enveloppé d'un anneau coulissant. Ainsi à une charge de 280 t, le diamètre parallèle à la direction des efforts s'est raccourci de 11 cm dans le premier cas et de 31 cm dans le second, tandis que le diamètre perpendiculaire s'est allongé de 3 cm dans le premier cas et de 27 cm dans le second. Les déformations du cadre rigide ont donc été 3 à 9 fois plus fortes que quand le même anneau rigide est employé seul.

#### 13. Tensions dans l'acier des cadres.

De même, les tensions dans l'acier des éléments des cadres ont été beaucoup plus faibles dans le cas de l'anneau rigide simple que dans le cas du double anneau. A la charge de 280 t, la tension maximum

TABLEAU XXIII.

| Résultats des essais sur des cadres métalliques. |             |               |            |  |   |   |                                  |  |                       |
|--|-------------|---------------|------------|--|---|---|----------------------------------|--|-----------------------|
| Firme  | Profil      | poids en kg/m | Forme      | Anneaux rigides ou coulissants           | Diamètre ou axes principaux intrados en m | Charge maximale avant flambage en t           | Diminution de section utile en % | Jauges 1 et 2 (fig. 14) situées à l'intrados côté charge |                       |
|  |             |               |            |  |   |   |                                  | Charge à laquelle est apparue une contrainte de          |                       |
|  |             |               |            |  |   |   |                                  | 10 kg/mm <sup>2</sup>                                    | 20 kg/mm <sup>2</sup> |
| 1. Rheinstahl-Wanheim                            | I 120       | 29,5          | circulaire | rigides                                  | 4,32                                      | 298   | 0                                | 71 t   | pas atteinte à 280 t  |
| 2. idem  | I 120       | 29,5          | circulaire | double revêtement : rigide et coulissant | 4,32<br>4,86                              | 280   | 4,6                              | 40 t   | 78 t                  |
| 3. Heintzmann                                    | (gouttière) | 36            | circulaire | rigide                                   | 4,32                                      | 320   | 1,4                              | 23 t   | 51 t                  |
| 4. idem  | »           | 36            | circulaire | coulissant                               | 4,32                                      | 317   | 12                               | 24 t   | 55 t                  |
| 5. idem  | »           | 36            | elliptique | coulissant                               | 4,29 × 3,78                               | 392   | 9,4                              | 38 t   | 80 t                  |
| 6. idem  | »           | 36            | circulaire | coulissant                               | 3,77                                      | (pas de flambage)<br>340<br>(pas de flambage) |                                  |  |                       |

mesurée est de 21 kg/mm<sup>2</sup> dans le premier cas, tandis que cette tension est déjà atteinte à 65 t dans le second cas. Dans l'anneau double, la limite élastique de l'acier est déjà atteinte localement à une charge de 120 t.

Le double revêtement est non seulement beaucoup plus coûteux, mais il est nuisible à la bonne utilisation de la résistance de l'acier.

Dans l'anneau double, par suite de la faible résistance au coulissement des assemblages de l'anneau extérieur, la charge uniformément appliquée sur un quart de la circonférence est presque entièrement transmise à l'anneau rigide interne par l'intermédiaire de quelques madriers en bois dur de 16 cm de largeur interposés entre les 2 anneaux. La concentration des charges en quelques points fait monter rapidement les tensions dans l'acier et donne lieu à des déformations précoces.

**2. COMPARAISON ENTRE LES DIVERS ESSAIS DE CADRES TOUSSAINT-HEINTZMANN**

En comparant les résultats des essais 3 à 6 résumés dans le tableau XXIII, on peut en conclure que la forme elliptique offre une meilleure résistance que la forme circulaire dans les conditions de l'essai, c'est-à-dire quand les charges sont appliquées sur

un quart de la circonférence et orientées suivant le grand axe de l'ellipse.

Si des poussées latérales devaient être prédominantes, il n'en serait plus de même.

**21. Charges maxima.**

Les charges maxima atteintes ont été les mêmes dans le cas d'un anneau rigide et dans le cas d'un anneau coulissant.

La charge maximale d'un anneau circulaire coulissant de 3,77 m de diamètre est 8 % plus grande que dans le cas d'un anneau coulissant d'un diamètre de 15 % plus grand.

La charge maximale portée par un anneau elliptique coulissant est 24 % plus élevée que celle portée par un anneau circulaire coulissant de même périmètre.

**22. Coulissement des cadres.**

Dans l'anneau coulissant circulaire, les assemblages de liaison entre éléments de cadres sont situés à 45° de l'axe des charges appliquées sur l'anneau, tandis que dans l'anneau elliptique, les assemblages sont situés sur des rayons faisant un angle d'environ 38°.

Dans le cas extrême, où la ligne des assemblages serait parallèle à la direction des efforts, le coulissement devrait avoir lieu à une charge de 80 t environ.

Le coulisement devrait donc s'opérer plus rapidement dans le cas de l'anneau elliptique que dans le cas de l'anneau circulaire.

Dans les 2 cas, cet angle augmente à mesure que l'anneau circulaire s'ovalise et que l'anneau elliptique se rapproche de la forme circulaire.

Dans le cas de l'anneau circulaire, le coulisement des assemblages, dont les boulons sont serrés avec un effort de 38 kgm, commence à 148 t et, lorsque les boulons sont serrés avec un effort de 44 kgm, ce coulisement commence à une charge de 273 t.

Dans le cas de l'anneau elliptique, le coulisement des assemblages, dont les boulons sont serrés avec un effort de 40 kgm, commence à 180 t et lorsque les boulons sont serrés avec un effort de 44 kgm, à 340 t.

### 23. Tensions dans l'acier des cadres.

Les tensions dans l'acier des cadres ont été mesurées en de très nombreux points à l'aide de jauges de contraintes.

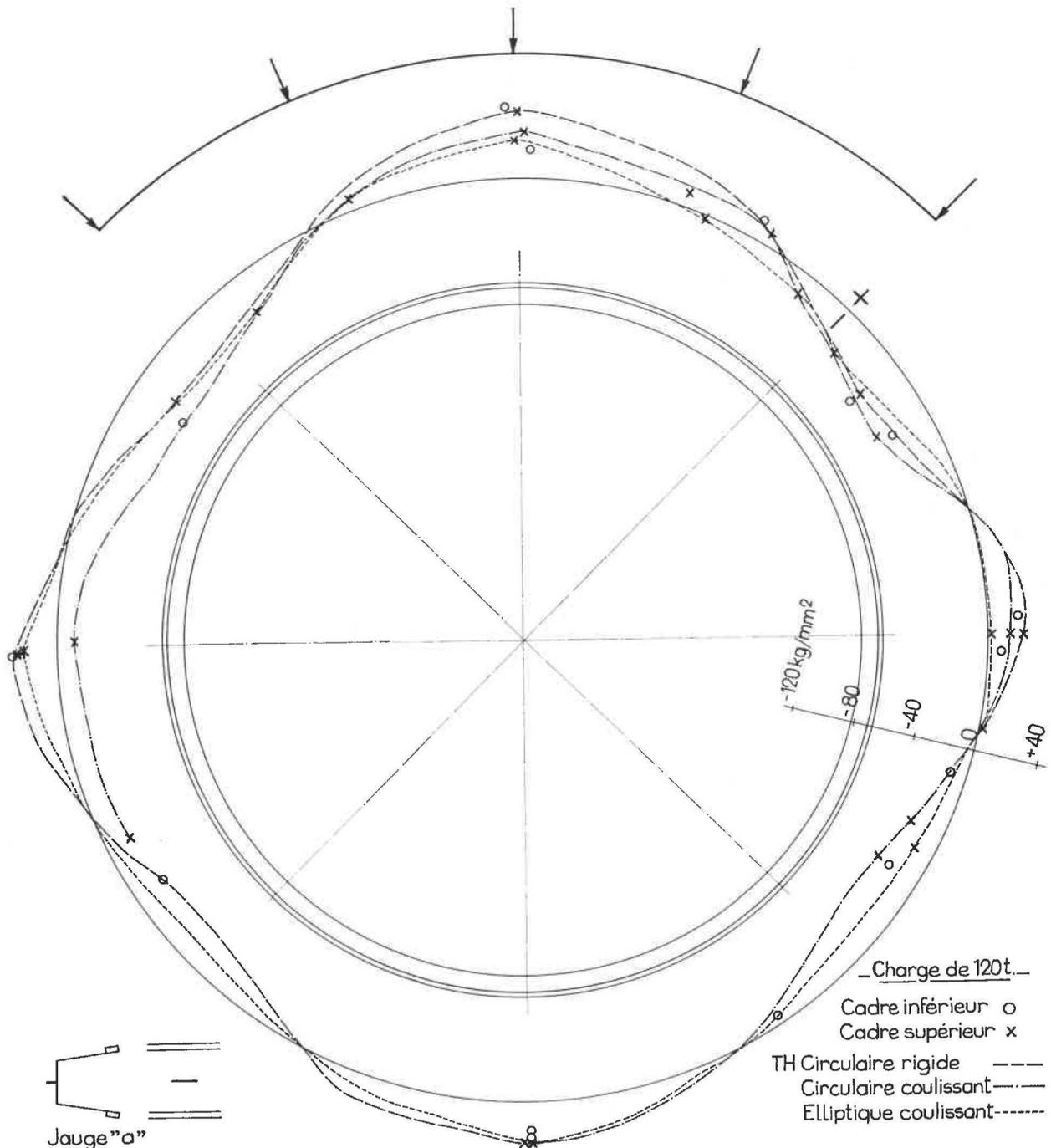


Fig. 83. — Variations des tensions dans l'acier des cadres circulaires rigides, circulaires coulissants et elliptiques coulissants mesurées au moyen des jauges collées sur la face intrados des cadres suivant l'axe longitudinal des cadres (jauge « a ») pour la charge de 120 t (échelle des tensions : 1 cm = 40 kg/mm<sup>2</sup>).

La limite élastique de l'acier a été atteinte localement

à 138 t pour l'essai sur cadres circulaires rigides

à 122 t pour l'essai sur cadres circulaires coulissants

à 244 t pour l'essai sur cadres elliptiques coulissants.

Les figures 83, 84 et 85 montrent les variations des tensions dans l'acier des cadres rigides circulai-

res, coulissants circulaires et coulissants elliptiques pour les jauges « a » collées à la face intrados des cadres pour les charges de 120 t, de 160 t et de 280 t. Ces jauges mesurent les tensions suivant l'axe longitudinal des profils.

Les figures 86 et 87 montrent les variations des tensions dans l'acier des trois différents anneaux

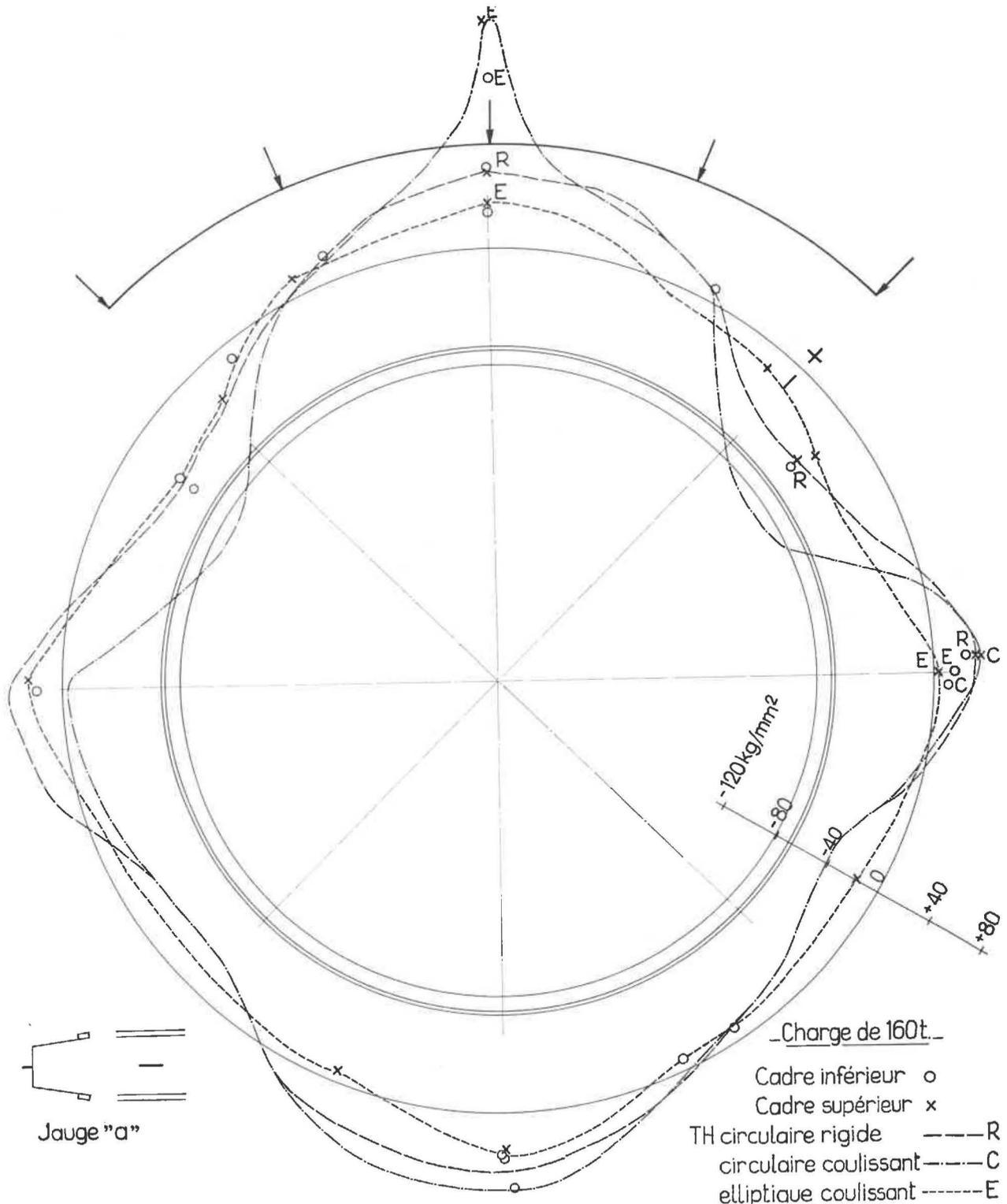


Fig. 84. — Variations des tensions dans l'acier des cadres circulaires rigides, circulaires coulissants et elliptiques coulissants mesurées au moyen des jauges collées sur la face intrados des cadres suivant l'axe longitudinal des cadres (jauge « a ») pour la charge de 160 t (échelle des tensions : 1 cm = 40 kg/mm<sup>2</sup>).

pour les jauges « b » aux charges de 160 t et de 280 t.

La figure 88 indique les variations des tensions dans l'acier des cadres des trois différents anneaux pour les jauges « c » aux charges de 120 t, de 160 t, et de 280 t.

La figure 89 indique les variations des tensions dans l'acier des cadres des anneaux coulissants circulaires et elliptiques pour les jauges « d » aux charges de 120 t, de 160 t et de 280 t.

Les tensions dans l'acier sont beaucoup plus faibles dans les anneaux elliptiques que dans le cas des cadres circulaires.

Les cadres circulaires rigides paraissent un peu plus résistants que les cadres circulaires coulissants si nous comparons les tensions dans l'acier aux mêmes charges ou les charges auxquelles des contraintes de 10 kg/mm<sup>2</sup> et de 20 kg/mm<sup>2</sup> sont apparues (tableau XXIII). Ces tensions sont un peu plus faibles dans le premier cas que dans le second.

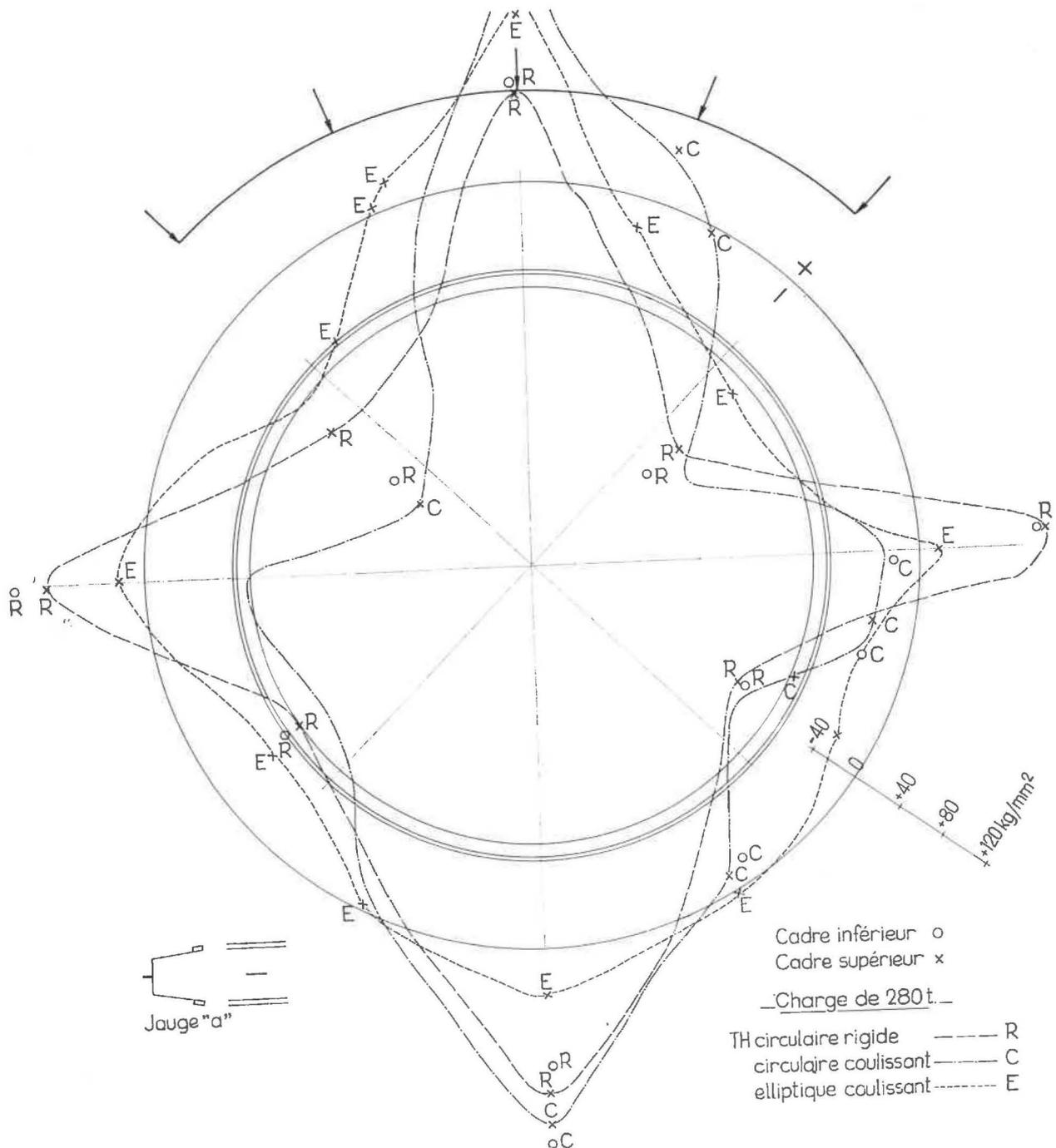


Fig. 85. — Variations des tensions dans l'acier des cadres circulaires rigides, circulaires coulissants et elliptiques coulissants mesurées au moyen des jauges collées sur la face intrados des cadres suivant l'axe longitudinal des cadres (jauge « a ») pour la charge de 280 t (échelle des tensions : 1 cm = 40 kg/mm<sup>2</sup>).

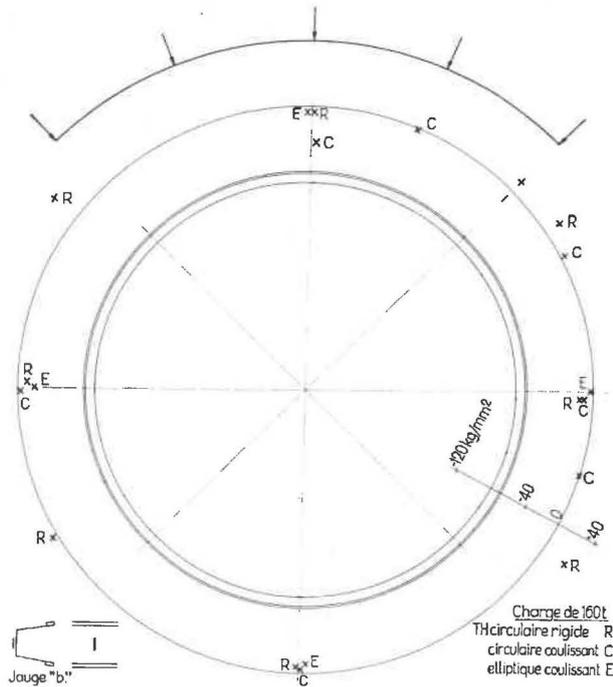


Fig. 86. — Variations des tensions dans l'acier des cadres circulaires rigides, circulaires coulissants et elliptiques coulissants mesurées au moyen des jauges collées sur la face intrados des cadres dans le sens transversal (jauge « b ») des cadres pour la charge de 160 t (échelle des tensions : 1 cm = 80 kg/mm<sup>2</sup>).

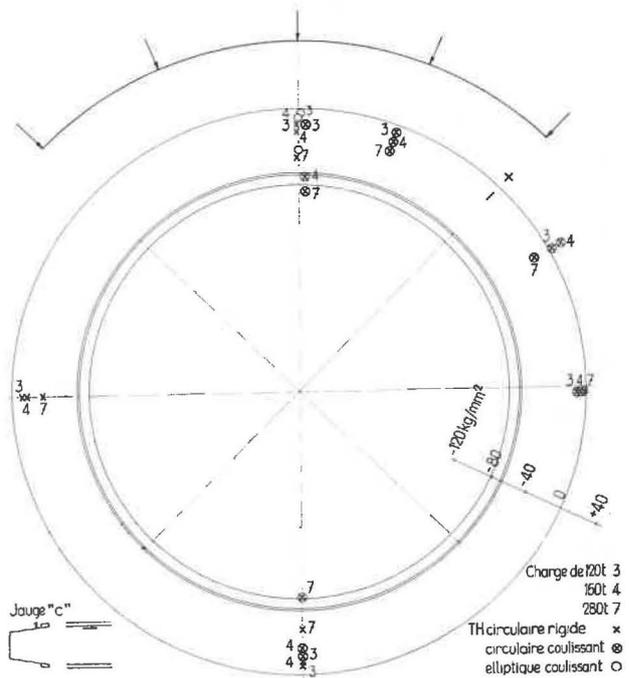


Fig. 88. — Variation des tensions dans l'acier des cadres circulaires rigides, circulaires coulissants et elliptiques coulissants mesurées au moyen des jauges collées sur un flanc du cadre suivant l'axe longitudinal (jauge « c ») pour les charges de 120, 160 et 280 t (échelle des tensions : 1 cm = 80 kg/mm<sup>2</sup>).

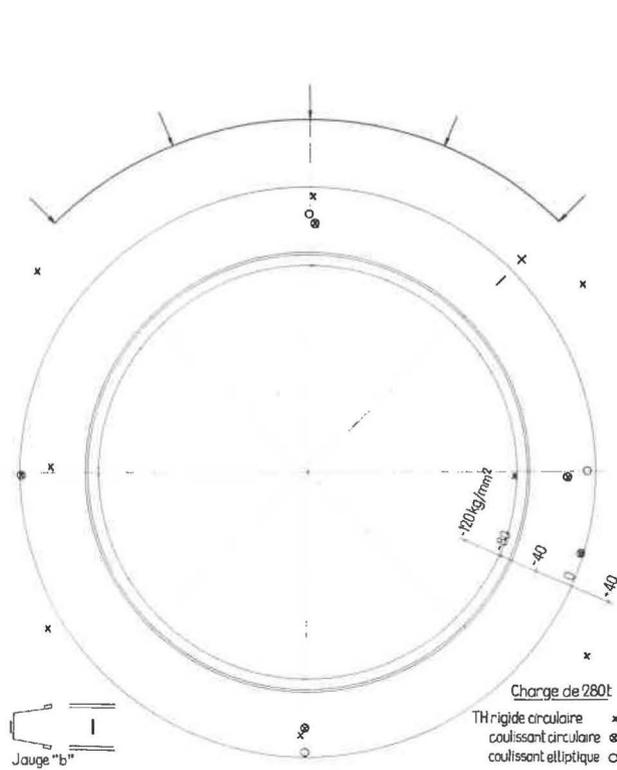


Fig. 87. — Variation des tensions dans l'acier des cadres circulaires rigides, circulaires coulissants et elliptiques coulissants mesurées au moyen des jauges collées sur la face intrados des cadres dans le sens transversal (jauge « b ») des cadres pour la charge de 280 t (échelle des tensions : 1 cm = 80 kg/mm<sup>2</sup>).

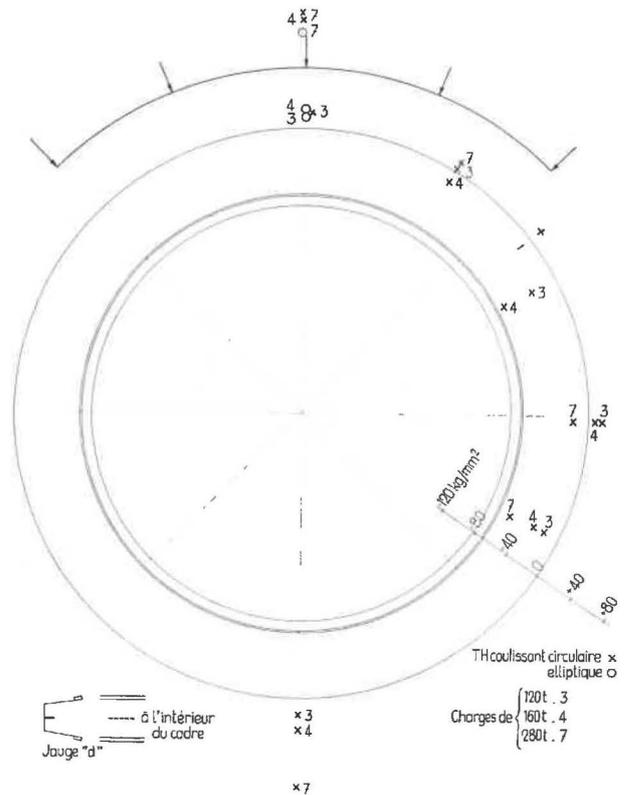


Fig. 89. — Variation des tensions dans l'acier des cadres coulissants circulaires et elliptiques mesurées au moyen des jauges collées à l'intérieur des cadres suivant l'axe longitudinal (jauge « d ») pour les charges de 120, 160 et 280 t (échelle des tensions : 1 cm = 80 kg/mm<sup>2</sup>).

### 3. COMPARAISON ENTRE LES ESSAIS SUR PROFILS I ET EN FORME DE GOUTTIERE

En comparant les essais 1 et 3 (tableau XXIII) effectués sur des anneaux circulaires rigides, on constate que, pour un anneau de même diamètre (4,52 m), les charges de flambage sont respectivement de 298 t et de 320 t, soit une augmentation de 7,5 % pour une augmentation de poids du profil de 22 %.

Le profil I a flambé par flexion locale dans le sens transversal (fig. 13) pour lequel le moment résistant n'est que de 32,6 cm<sup>3</sup>. Avec le profil en forme de gouttière dont le moment résistant transversal est de 151 cm<sup>3</sup>, l'essai a dû être arrêté par suite de l'écartement des deux lèvres du profil (fig. 56).

A poids égal, le profil en forme de gouttière coûte un rien plus cher que le profil I de fabrication plus courante, mais par contre il convient mieux pour les cadres coulissants.

### CONCLUSION

Dans le cas des cadres coulissants, la forme elliptique offre une meilleure résistance que la forme circulaire, quand les charges sont appliquées sur un quart de la circonférence et orientées suivant le grand axe de l'ellipse.

Les cadres circulaires rigides paraissent un peu plus résistants que les cadres circulaires coulissants tant au point de vue de la charge à laquelle apparaît le flambage qu'au point de vue des contraintes mesurées.

Il paraît inopportun d'envelopper un anneau rigide par un second anneau coulissant.

### REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement la direction et les services techniques des firmes Rheinstahl-Wanheim et Bochumer-Eisenhütte Heintzmann pour toute l'aide qu'ils ont apportée à la bonne réalisation de ces essais.