

**expérimentation en vraie grandeur
de buses métalliques sous haut remblai**

full scale experimentation of metal culverts under high embankment

L. BAUDE

Davum, T.P.*

P. HABIB

Laboratoire de Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique**

B. LEGEAY

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées***

N.T. LONG

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées***

M.P. LUONG

Laboratoire de Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique**

A. MILLAN

Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes****

Résumé

Le comportement des buses métalliques enterrées sous recouvrement important dépend de l'interaction mécanique entre la structure flexible et le sol environnant sous les conditions de charge subies au cours de leur construction et aussi lorsqu'elles sont en service.

Une expérimentation en vraie grandeur a été effectuée sur trois buses circulaires de 2,50 m de diamètre; l'une est de conception classique, les deux autres comportent soit un, soit deux dispositifs contractables devant permettre de reporter dans le sol environnant une partie des contraintes normalement supportées par l'ouvrage.

Abstract

The behaviour of buried structures in earth embankments is related to the stiffness properties of the composite system comprising both the buried structure and the surrounding soil taken as a basic structural unit responding to loading imposed on the system.

A field experience on corrugated metal culverts equipped with contractable seams has been carried out in order to verify the transfer of load to or away from the buried structure as a result of the difference in stiffness properties of the structure, with its adjacent uncompassing material and the surrounding expanse of soil.

* 28, bd Galliéni, 92390 Villeneuve-la-Garenne.
** 91128 Palaiseau.

*** 58, bd Lefebvre, 75015 Paris.
**** 46, av. Aristide-Briand, 92220 Bagneux.

1. INTRODUCTION

L'étude expérimentale de buses métalliques souples enterrées sur le site de Dourdan, a été entreprise dans le cadre d'une Action Concertée de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique. Le programme portait sur trois cellules d'essai cylindriques qui n'étaient différentes que par la présence ou non, de joints contractables.

L'ouvrage n'a subi que les efforts de poussée des remblais latéraux et le poids du remblai de couverture et n'a été soumis à aucune charge extérieure de service (charge dynamique ou roulante).

Lors de la mise en place des remblais latéraux et du remblai de couverture nous avons mesuré :

- les déplacements verticaux au niveau du terrain naturel et du plan critique, à l'aide de tassomètres L.P.C. ;
- les déplacements horizontaux des buses et remblais latéraux,
- la déformation des joints contractables,
- la déformation des buses en mesurant, par rapport à un repère indépendant de celles-ci, la distance de points appartenant à une même section transversale,
- les contraintes dans le remblai au voisinage des buses à l'aide de capteurs Gloetzl,
- les contraintes dans l'acier par jauges de déformation.

Des essais annexes, tels qu'essais pressiométriques, essais triaxiaux, mesures de poids volumique, ont été effectués pour déterminer les caractéristiques géotechniques ou mécaniques des matériaux de fondation et de remblayage ; les caractéristiques mécaniques des tôles ont été déterminées par des essais de traction-compression simple.

Seuls ont été retenus, pour en tirer des conclusions, les résultats des mesures qui ne peuvent faire l'objet d'aucun doute, ni en raison du fonctionnement général de l'appareillage, ni quant à leur niveau par comparaison avec des mesures suivantes ou précédentes ou faites par des appareils de même nature situés au voisinage immédiat.

2. DESCRIPTION DU SITE ET DE L'OUVRAGE

2.1. Sol de fondation

Les sondages ont donné les résultats suivants :

Entre 0 m et - 1,5 m : Sable grisâtre caractérisé par sa pression-limite indiquée par un pressiomètre de Ménard

$$(0,85 \text{ MPa} < p_{\ell} < 0,95 \text{ MPa})$$

et par son module pressiométrique

$$(7,2 \text{ MPa} < E_p < 11 \text{ MPa})$$

De - 1,5 m à - 7 m et plus : Sable fin orangé
($p_{\ell} > 2 \text{ MPa}$ et $E_p > 30 \text{ MPa}$)

2.2. Matériau de remblai

Il s'agit d'un sable fin siliceux, jaunâtre à la teneur en eau naturelle de 5 % environ, et blanchâtre à l'état sec. La granulométrie est uniforme ; le diamètre moyen des grains D_{50} est de 0,25 mm. Il y a moins de 2 % de grains inférieurs à 2μ (fig. 1).

SABLE DE DOURDAN

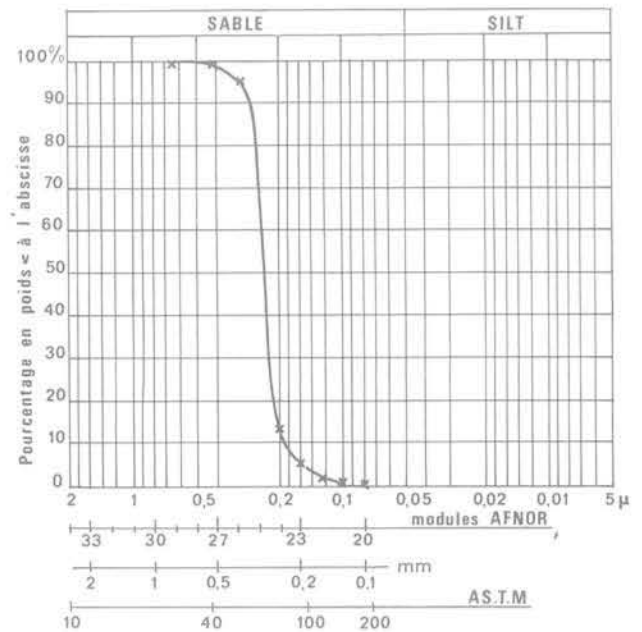


Fig. 1. — Granulométrie du sable de Dourdan.

Un essai de compressibilité effectué sous une contrainte isotrope de 0,3 MPa sur un échantillon de densité sèche 1,42 a donné les valeurs suivantes de la compressibilité volumique :

$$\text{Tangente } K_t = 79,4 \text{ MPa}$$

$$\text{Sécante } K_s = 30,6 \text{ MPa}$$

Avec une valeur $\nu = 0,3$ pour le coefficient de Poisson, on obtient pour le module d'Young, les valeurs :

$$E_t = 166,6 \text{ MPa}$$

$$E_s = 64,3 \text{ MPa}$$

2.3. Buses métalliques

Les essais furent effectués sur trois tronçons courts de buses ARVAL Multijoint de section circulaire, de diamètre 2,5 m et de longueur 7,5 m. L'accès était assuré par un tunnel de service, en l'occurrence une buse ARVAL minijoint de $\varnothing 2 \text{ m}$.

Le tableau I ci-dessous donne la compressibilité du remblai sous charge œdométrique, à différentes densités sèches:

Épaisseur nominale: $e = 2,5$ mm
 Longueur d'onde: $\lambda = 1/6$ m = 166,67 mm
 Profondeur nominale: $2v = 60$ mm

Tableau I

γ_d kN.m ⁻³ Poids volumique à sec	$E_s^{\text{œd}}$ MPa Module œdométrique sécant	K_o Coefficient de poussée au repos	ν Coefficient de Poisson	E_s MPa Module d'Young sécant
15,8 (1)	93,8	0,27	0,21	83,30
15,0 (2)	41,9	0,19	0,16	39,35
13,9 (3)	8,0	0,16	0,14	7,64
13,7 (3')	8,8	0,11	0,10	8,60
12,8 (4)	3,75	0,10	0,05	3,68
10,3 (5)	2,83	0,05	0,05	2,82

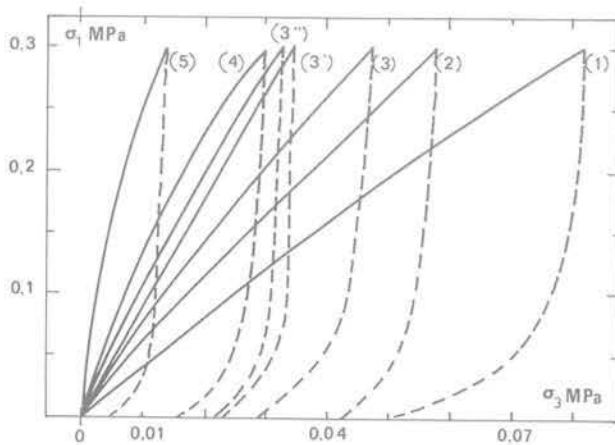


Fig. 2. — Contraintes œdométriques à différentes densités initiales.

— **La cellule courte n°0.** Elle comportait trois anneaux strictement normaux composés de cinq plaques standard Multijoint à huit intervalles (longueur d'arc 1,6) dont chaque ondulation (longueur d'onde 1/6 m ou 166,67 mm et profondeur 60 mm) porte au voisinage de chaque rive ondulée quatre trous pour boulons d'assemblage, positionnés sur l'axe neutre.

— **La cellule courte n°1.** Chacun de ses trois anneaux comportait quatre plaques Multijoint standard correspondant à la description ci-dessus et un dispositif contractable ayant le même encombrement et la même ondulation qu'une plaque standard; ce dispositif était disposé dans l'axe du radier.

— **La cellule courte n°2.** Chacun de ses trois anneaux se composait d'une plaque standard dans l'axe du radier, de deux dispositifs contractables assemblés de part et d'autre de cette plaque et d'un sommet composé de deux plaques standard Multijoint. De cette manière, les dispositifs étaient situés aux extrémités du diamètre horizontal de la cellule, mais de façon dissymétrique par rapport à ce diamètre.

Les caractéristiques principales des ondulations Multijoint sont:

Moment d'inertie: $I = 1,22 \cdot 10^{-6}$ m⁴/m

Module d'inertie: $I/\nu = 4,1 \cdot 10^{-5}$ m³/m

La disposition des cellules d'essai est montrée par la photographie de la figure 3 et précisée sur le plan de la figure 4. La figure 5(a) montre le chantier expérimental une fois les buses remblayées, la figure 5(b) le dispositif de mesure des déplacements horizontaux.



Fig. 3. — Montage des buses avant remblaiement.

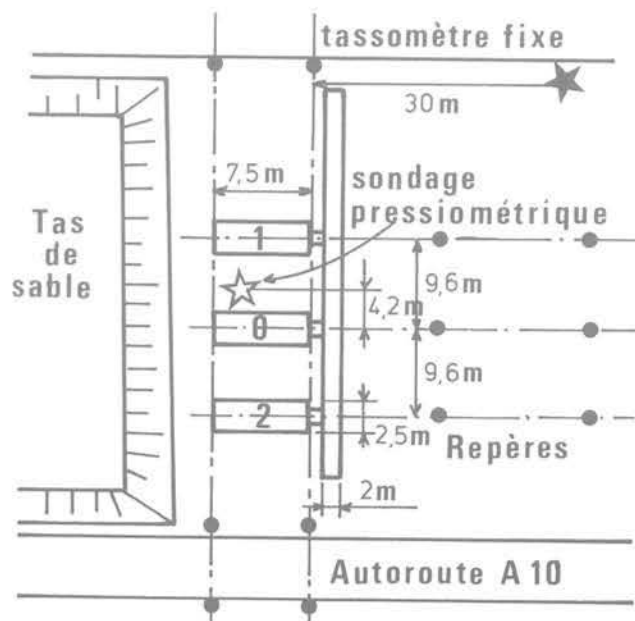


Fig. 4. — Disposition des buses d'essais.



Fig. 5(a). — Remblaiement des buses terminé.

La partie « buse métallique » de la cellule courte d'essai évolue librement sous les charges entre deux voiles métalliques minces, installés verticalement à proximité immédiate de ses deux extrémités (50 mm). Ces voiles sont reliées entre eux et contrebutés par des tubes passant au milieu de la partie « buse », parallèlement à son axe, mais sans aucun contact avec celle-ci, même après déformation transversale.

L'intervalle de 50 mm existant entre les deux voiles et les deux extrémités de la « buse » est muni d'un bourrage destiné à éviter toute introduction de matériau de remblai (tube de néoprène rempli de sable). On pouvait s'attendre à certaines différences de comportement de la partie « buse », par rapport à un ouvrage de section et de composition identiques mais de longueur normale (50 m ou plus) du fait des facteurs suivants :

- a. Apparition de contraintes tangentielles (sensiblement verticales) dans les régions qui séparent la « tranche verticale de remblai » reposant directement sur les 7,5 m de buse et le reste du remblai qui repose sur le sol de fondation. Ces cisaillements seraient causés par la différence de raideur entre la buse métallique et le remblai avoisinant.
- b. Apparition dans le remblai de contraintes de frottement et de cisaillement dues à la présence des deux voiles métalliques verticaux (section horizontale d'acier de 300 cm² environ).
- c. Frottements entre bourrages de néoprène et voiles métalliques de soutènement, dus aux déformations transversales de la buse.

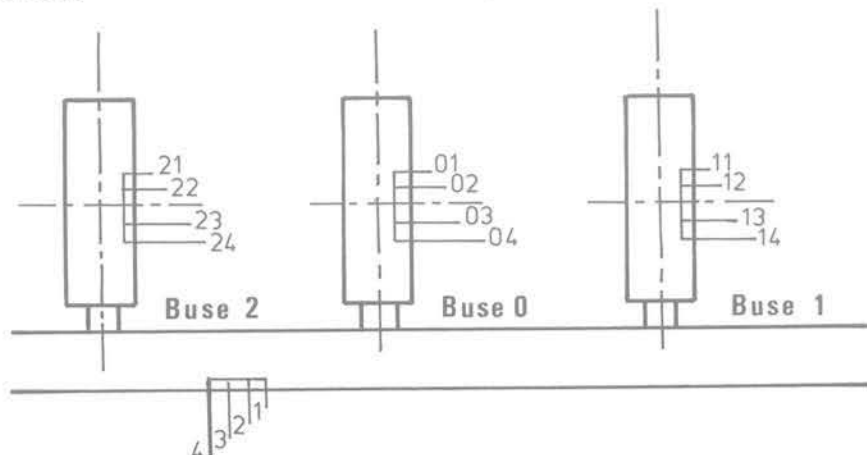


Fig. 6. — Implantation des mesures de déplacements du remblai.



Fig. 5(b). — Mesures de déplacements horizontaux: plot de béton et tube de P.V.C

Remarquons que l'effet du facteur a. ne peut être sensible que s'il existe une forte différence de compressibilité entre la buse et le remblai avoisinant, ce qui serait contraire à l'hypothèse de calcul du fabricant ARVAL et à l'expérience actuellement acquise. Les facteurs b et c peuvent être considérés comme négligeables.

3. PROGRAMME DE MESURE, APPAREILLAGE ET DISPOSITIFS

3.1. Les mouvements verticaux ont été mesurés par des tassomètres du type L.P.C. raccordés à un tableau central situé au dehors, près de l'entrée du tunnel de service.

Le principe en est très simple: les déplacements verticaux du tassomètre engendrent une variation correspondante du niveau de l'eau dans un tube gradué fixé au tableau.

3.2. Les mouvements horizontaux ont été mesurés par des tiges d'acier horizontales coulissant dans une gaine de protection et dont un bout dépasse dans la buse à travers une perforation, tandis que l'autre extrémité est rigidement reliée à un corps mort noyé dans le remblai à une certaine distance de la buse (dalles de béton de 400 × 400 × 50 mm) (fig. 6).

3.3. Les dispositifs contractables sont composés de plaques ondulées analogues aux plaques standard Multijoint (mêmes ondulations et même moyen de cintrage); l'ensemble du dispositif occupe la place d'une plaque standard avant qu'aucune pression ne s'exerce sur la buse; on peut donc incorporer un ou plusieurs de ces dispositifs dans la composition des anneaux d'une buse ARVAL.

Au-delà d'un certain seuil de compression périphérique dans l'anneau, ces dispositifs commencent à glisser et à se raccourcir; ils peuvent ainsi perdre progressivement jusqu'à 24 cm de longueur d'arc. Ce raccourcissement peut être mesuré à lecture directe entre deux repères.

Du fait de ces dispositifs, le périmètre de la cellule n° 1 pouvait se raccourcir de 3% environ, et celui de la cellule n° 2 de 6%.

Le but de ces dispositifs est de rendre la buse plus déformable que le remblai avoisinant et de transférer ainsi une part de ses charges sur le remblai avoisinant (effet de voûte).

Le graphique de la figure 7 donne le déplacement de coulissement en fonction de la force.

3.4. Les déformations transversales se déduisent, par calcul, de trois mesures de distance entre trois points de référence rigidement fixés sur un triangle métallique et vingt cibles rigidement fixées sur l'ondulation centrale de chaque cellule courte; chacune de ces cibles matérialise une position angulaire déterminée, par rapport à l'axe vertical de la buse, comme le montre la figure 8.

3.5. Les contraintes dans le remblai ont été mesurées par des cellules Gloetzl placées aux endroits du remblai illustrés par la figure 9.

3.6. Les contraintes dans le métal ont été mesurées par des jauges de contrainte classiques collées aux ondulations dans trois positions pour chaque section choisie:

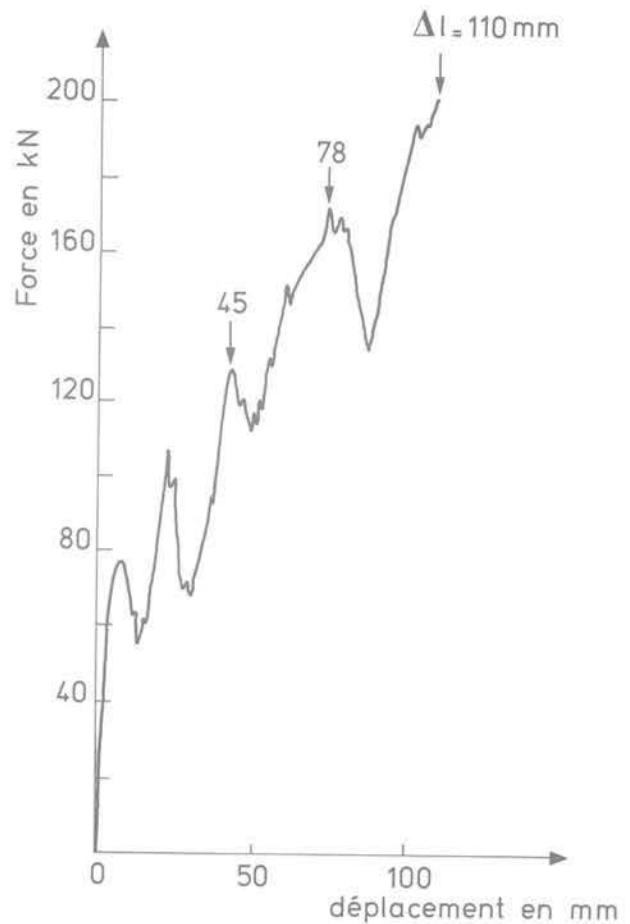


Fig. 7. — Coulissement du joint contractable.

Jauge 1 sur la fibre externe (un creux d'onde vu de l'intérieur).

Jauge 2 sur l'axe neutre de l'ondulation.

Jauge 3 sur la fibre interne (sommets d'onde vu de l'intérieur).

Ce système permet une double mesure de la contrainte normale à la section droite (lecture sur 2 et moyenne des lectures 1 et 3) ainsi qu'un calcul des contraintes de flexion et des moments.

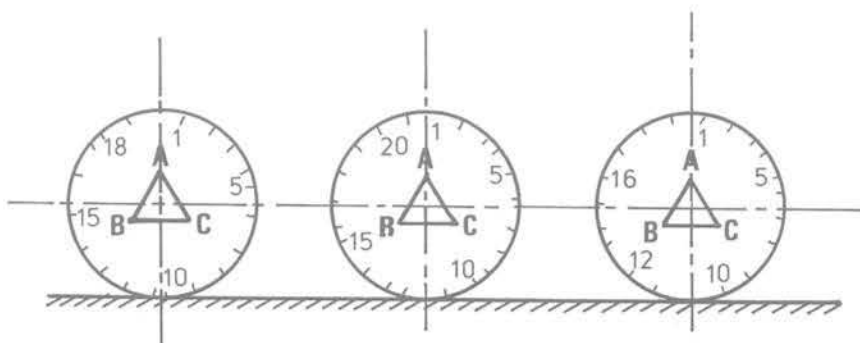


Fig. 8. — Mesures de convergence des buses.

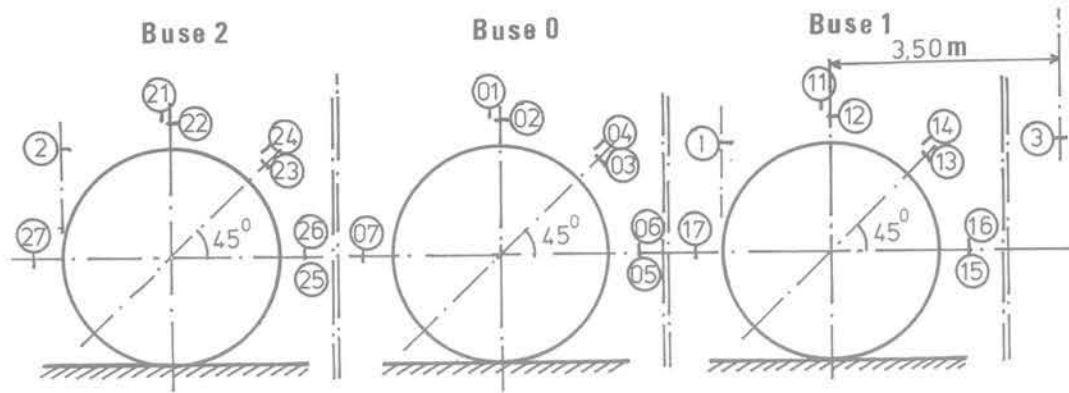


Fig. 9. — Mesure des contraintes dans le remblai : implantation des capteurs.

La position des jauges est indiquée sur la figure 10.

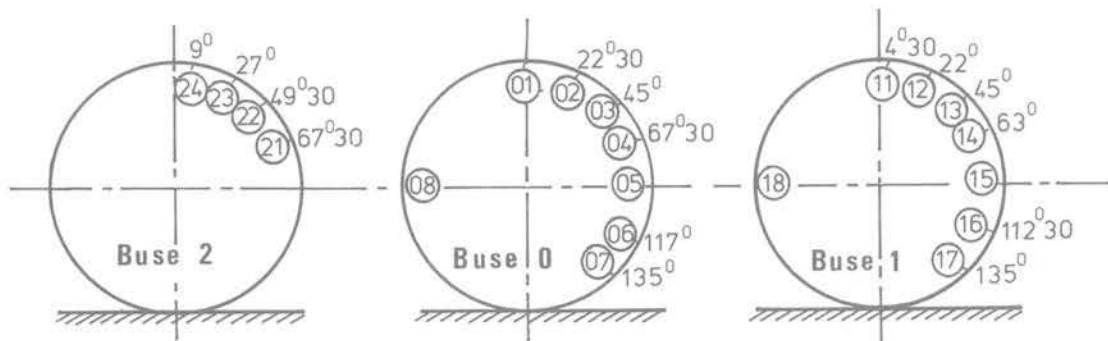


Fig. 10. — Mesures des contraintes dans les buses métalliques.

3.7. Mesures de densité faites à divers stades de la construction; les chiffres sont donnés dans le tableau II ci-après.

Tableau II

h (m)	γ kN.m ⁻³	γ_d kN.m ⁻³
5,50	15,7	
	17,5	
7,50	15,5	
	17,0	
8,50	17,7	16,4
	17,5	16,3
	17,3	16,0
	18	16,7
	17,1	16,0
	17,0	15,8
10,50	17,9	16,3
	16,0	14,8
	17,8	16,4
13,50	16,3	15,1
	16,4	15,3

4. RÉSULTATS DES MESURES

4.1. **Mouvements verticaux.** Les sommets des buses se sont d'abord déplacés vers le haut pendant les premières phases de construction du remblai (de 0 m à 2,5 m depuis le niveau de la fondation): la valeur maximale de ce déplacement a été de l'ordre de 10 mm.

Au cours de l'apport de matériaux au-dessus des sommets, ces mouvements se sont inversés, les sommets ont repris leur position initiale puis ont continué à descendre: l'amplitude maximale, de l'ordre de 40 mm, fut atteinte pour le maximum de couverture de 15 m.

Le tassement des radiers et du terrain naturel de fondation fut de l'ordre de 16 mm.

4.2. **Mouvements horizontaux.** Les résultats des mesures sont assez dispersées et n'ont pas été retenus pour l'interprétation.

Ils sont d'ailleurs de très faible amplitude et partiellement masqués par les mouvements erratiques des corps morts sous la circulation des engins; le degré de précision du dispositif est insuffisant pour qu'on puisse en tirer d'autres conclusions.

4.3. Rétrécissements des dispositifs contractables. Ils ne se sont pas produits bien que les sollicitations de compression aient dépassé le seuil

(mesuré en laboratoire, voir figure 7) à partir duquel auraient dû se produire les glissements.

4.4. Déformations transversales. Les valeurs calculées à partir des mesures de convergences ont permis de tracer avec précision les déformées reproduites dans les figures 11a, b, c, d avec des formes d'autant plus inhabituelles que les mouvements ont été amplifiés vingt fois.

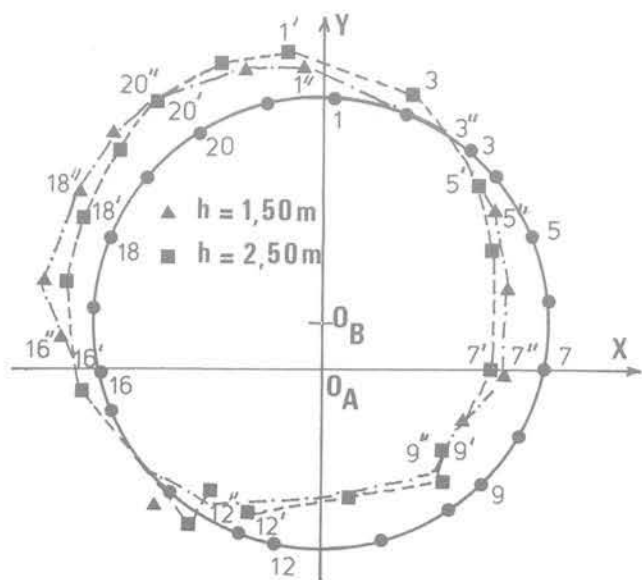


Fig. 11a. — Déformée de la buse 0 au cours du remblayage.

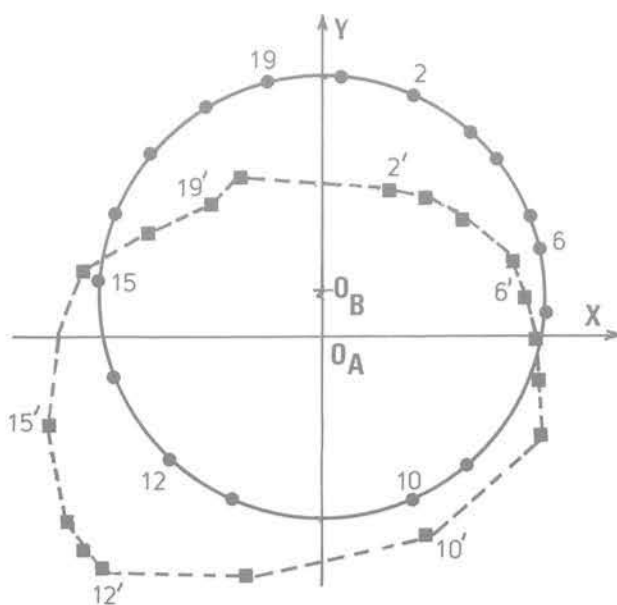


Fig. 11c. — Déformée de la buse 1 sous 15 m de couverture.

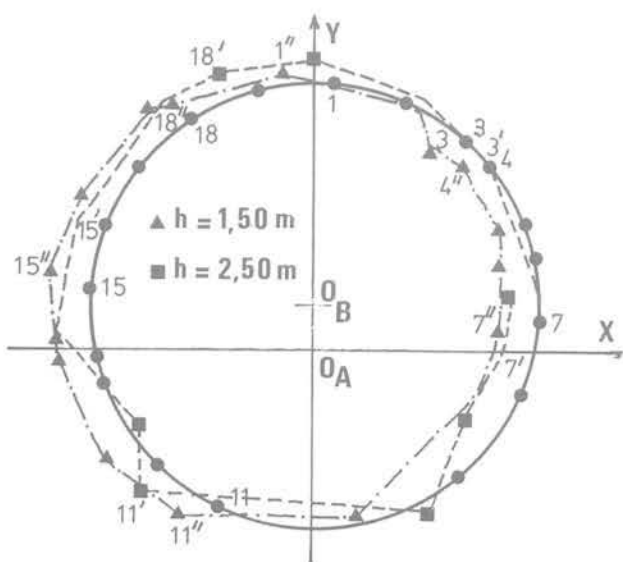


Fig. 11b. — Déformée de la buse 1 au cours du remblayage.

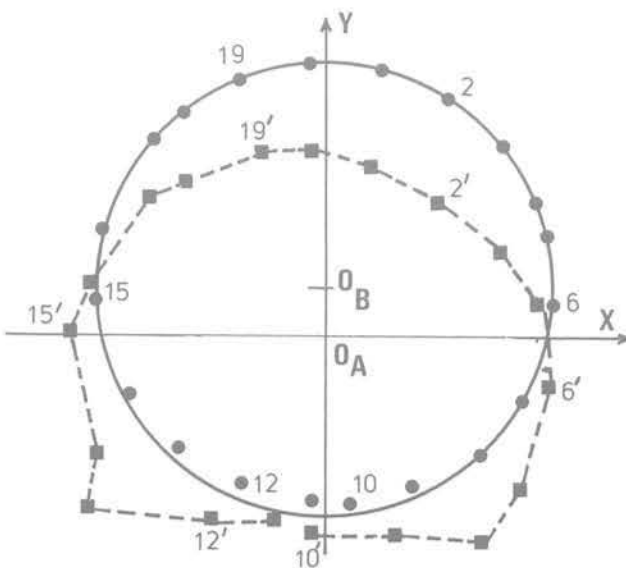


Fig. 11d. — Déformée de la buse 2 sous 15 m de couverture.

Remarquons que la plupart des chiffres sont recoupés puisqu'il suffisait (théoriquement) de deux points de référence et qu'on en a mis trois en œuvre; deux calculs ont donc pu être faits pour la plupart des points et les coordonnées X et Y des cibles sont donc très précises. Les raccourcissements nets des diamètres verticaux sont de l'ordre de 18 mm pour la hauteur de couverture maximale (15 m) et les allongements des diamètres horizontaux sont du même ordre de grandeur.

4.5. Contraintes dans le remblai. Les chiffres fournis par les mesures ne correspondent ni au poids des terres ni aux indications des jauges de contrainte dans le métal. On se bornera donc à constater que les variations des pressions mesurées correspondent à celles de la hauteur de couverture, corrigée d'un coefficient dû à la forme en pyramide trapézoïdale du tas qui varie au cours de la construction.

Les résultats des mesures horizontales montrent un état de contrainte intermédiaire entre poussée et butée; le rapport $K_0 = \sigma_H/\sigma_V$ décroît à mesure qu'augmente la hauteur de couverture.

4.6. Contraintes dans le métal. Pour une hauteur de couverture donnée, la contrainte de compression varie assez peu sur le périmètre de la buse. Le niveau de contraintes mesuré est significativement plus élevé que les chiffres résultant de la théorie de l'anneau comprimé de WHITE et LAYER [1] alors que la forme pyramidale du tas pouvait porter à corriger ces chiffres en baisse.

Les contraintes dues à la flexion sont souvent significativement plus élevées que les contraintes normales mesurées sur l'axe neutre des mêmes sections. Des dépassements de limite élastique se sont produits en flexion dans les zones des radiers.

Les diagrammes polaires de flexion mettent en évidence huit points de moment nul (quatre zones en flexion positive où la courbure s'accroît et quatre zones en flexion négative avec perte de courbure). Pendant la phase de remblaiement, depuis 0 jusqu'à plus de 2,5 m, on ne relève que six points de moment nul.

5. RÉSULTAT NUMÉRIQUES

La méthode des éléments finis offre ici un outil puissant et souple pour analyser numériquement l'interaction entre la structure flexible placée dans un remblai déformable. En effet, les charges imposées sur l'ouvrage dépendent de la déformabilité relative de la structure et du sol, car les actions du sol sur la structure produisent des déplacements qui, à leur tour, déterminent les sollicitations.

Cette méthode permet de tenir compte des zones de caractéristiques mécaniques différentes, de simuler les séquences réelles des opérations de construction et

d'obtenir une image plus complète des performances (contraintes et déformées) de la structure en cours de sa construction, aussi bien qu'après lorsqu'elle est en service.

La précision du calcul sera examinée en comparant les déformées calculées et observées, ce qui permet de connaître, avec toute confiance, les contraintes dans la structure et dans le massif de sol.

La rigidité globale R de l'ensemble sol-structure résulte de rigidités partielles du sol R_s , de la structure R_b et de l'interface R_i :

$$R = R_s + R_b + R_i$$

Si le comportement de la structure est supposé élastique linéaire, le terme R_b est constant. La discrétisation en éléments finis peut soit être la même pour la structure et pour le sol, soit consister en élément poutre.

Le contact sol-structure peut être modélisé de deux façons extrêmes:

- i. l'interface est parfaitement lisse,
- ii. l'interface est parfaitement rugueuse.

Si il n'y a pas décollement du sol et de la paroi de la structure, le déplacement relatif de deux points de l'interface — l'un appartenant au sol, l'autre à la structure — est donc toujours tangent à la structure.

L'influence de la nature de l'interface est donnée sur la figure 12 où on peut remarquer que l'interface lisse uniformise l'effort normal sur tout le périmètre et que l'interface rugueuse entraîne une diminution de cet effet en clé de la structure et un accroissement à mi-hauteur.

Les sols de remblai sont supposés avoir un comportement élastique linéaire.

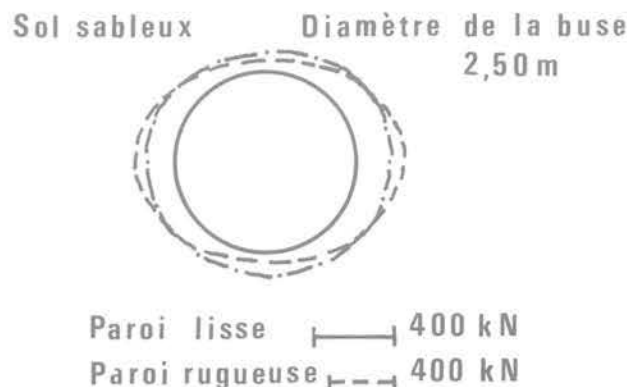


Fig. 12. — Influence de l'interface sol-structure sur l'effort normal dans la buse enterrée.

Les figures 13a et 13b montrent les contours des contraintes horizontales σ_{xx} et verticales σ_{yy} dans le massif de remblai au-dessus de l'assise rigide délimitant la zone de concentration de contrainte autour de la buse.

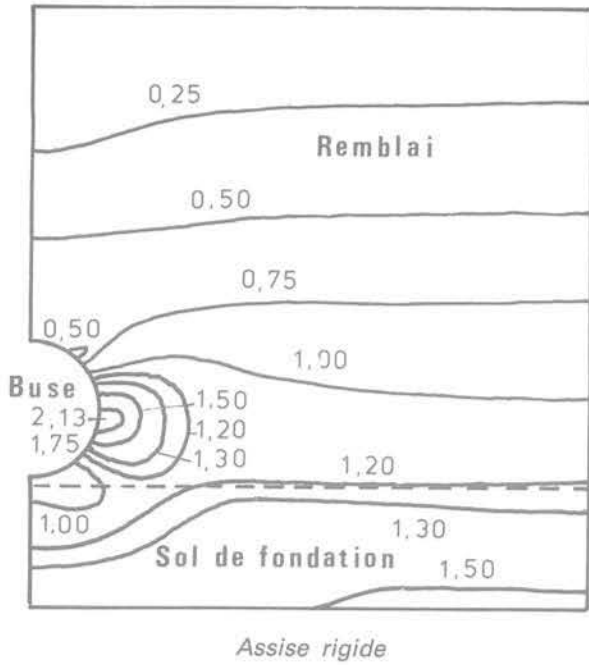


Fig. 13a. — Contours des contraintes σ_{xx} dans le massif de sol (10^5 Pa).

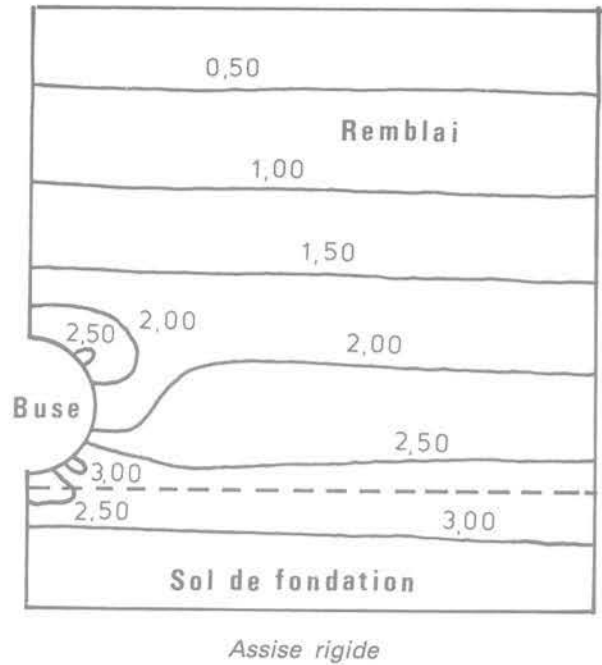


Fig. 13b. — Contours des contraintes verticales σ_{yy} dans le massif de sol (10^5 Pa).

Le sable de Dourdan s'est révélé un bon sol de remblai, voire trop bon pour notre programme expérimental. Il a été nécessaire de chiffrer à l'avance les paramètres à mesurer en fonction du module de déformabilité du remblai technique.

La figure 14 compare les contraintes maximales calculées dans la buse munie d'un dispositif rétractable et dans la buse ordinaire sans joint pour différentes compressibilités du remblai technique.

La figure 15 montre la déformée verticale des buses munies de joint coulissant et sans joint en fonction de la compressibilité du massif de remblai technique.

La figure 16 donne la variation du glissement du joint rétractable supposé linéaire avec la charge supportée par la buse en fonction du module E_t de déformabilité du remblai technique.

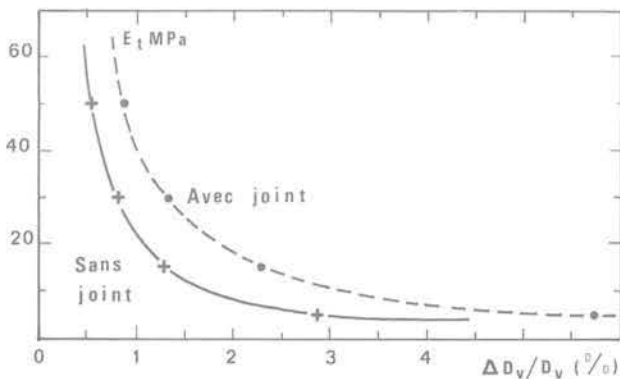


Fig. 14. — Contraintes dans la buse en fonction de la compressibilité du remblai technique.

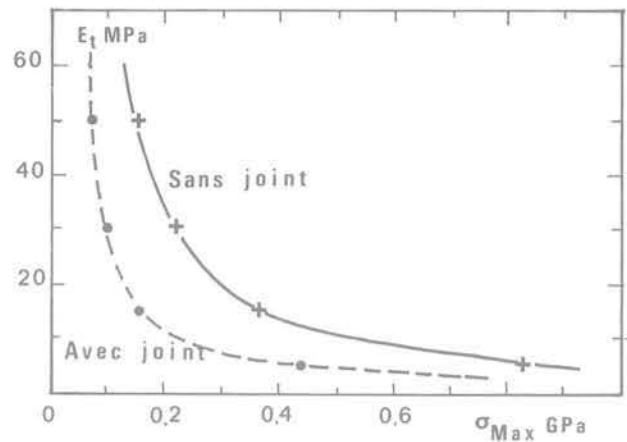


Fig. 15. — Déformée verticale de la buse en fonction de la compressibilité du remblai technique.

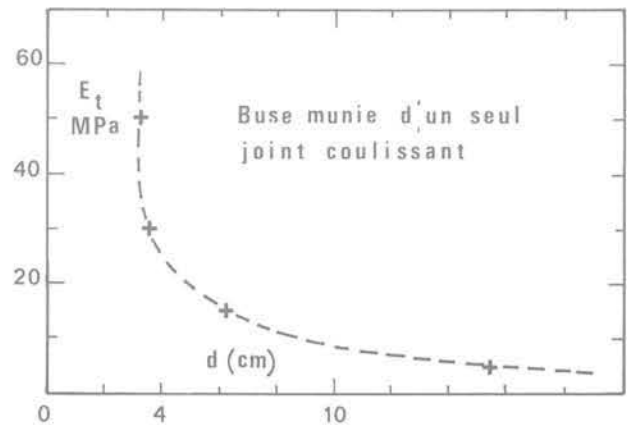


Fig. 16. — Glissement du joint en fonction de la compressibilité du remblai technique.

Un calcul numérique du comportement d'une buse métallique placée dans le remblai du site expérimental à la fin du programme d'essai D.G.R.S.T. pour une hauteur de recouvrement de 15 m au-dessus de la clé de la buse, a donné les résultats suivants:

— l'effort normal N varie de 141,4 kN/m en clé à 441,4 kN/m au piedroit;

— le moment fléchissant M est important au plancher et au piedroit avec une valeur maximale de - 2,291 kN.m un peu plus faible que les valeurs expérimentales obtenues de l'ordre de 4 kN.m;

— les contraintes σ_{xx} exercent une valeur maximale de 278 kPa sur le piedroit de la buse;

— les contraintes σ_{yy} varient de 196,7 kPa à 404,2 kPa;

— les contraintes σ_{xy} s'échelonnent de 97,8 kPa à 148 kPa;

— l'ovalisation verticale est 0,35 % pour un aplatissement de 0,92 %. Ces valeurs semblent en accord avec les mesures relevées au chantier;

— le tassement superficiel est de l'ordre de 3,4 mm maximum.

Ce calcul numérique relativement simple utilisant une loi de comportement élastique a permis de retrouver l'ordre de grandeur des valeurs mesurées sur chantier. Il s'est ainsi révélé indispensable pour le dimensionnement des ouvrages réels.

6. COMMENTAIRES

6.1. Précontrainte négative

Comparativement à l'ensemble des ouvrages flexibles en tôle ondulée actuellement offerts sur le marché, les buses mises à l'essai se situent parmi les ouvrages de raideur élevée dans leur section transversale mais sans excès; la limite au-dessous de laquelle on peut hésiter à classer un ouvrage comme « flexible » n'est pas très éloignée. On constate cependant que la poussée du remblai latéral a suffi à déformer cet ouvrage négativement, de 0,4 % environ, et à introduire dans sa paroi des moments et contraintes négatifs importants qui se soustrairont ultérieurement des moments et contraintes positifs résultant de l'application des charges; dans le cas présent, la diminution serait de l'ordre de 25 à 30 %. Autrefois, cet effet était artificiellement accentué soit en étayant le sommet, soit en exerçant des tractions sur les flancs, au niveau du diamètre horizontal.

Aucun calcul courant ne prend en compte cet élément d'autant plus favorable que la poussée des terres est élevée pendant la phase de construction des remblais techniques.

Rappelons qu'en l'occurrence, la poussée sur les buses de Dourdan n'a pu être que faible, tant en raison de la nature du matériau, que de l'absence de tout travail en compactage.

6.2. Mouvements horizontaux

On constate qu'il est difficile de mesurer les mouvements horizontaux différentiels qui peuvent se produire dans la zone voisine du flanc d'une buse flexible, pour trois raisons:

- faible amplitude des mouvements;
- difficulté de repérage des points à suivre,
- absence de point fixe de référence.

6.3. Joints contractables

Ces dispositifs auraient dû commencer à fonctionner pour un effet normal de compression périphérique $N = 200$ kN/m. Selon le calcul par la méthode de l'anneau comprimé, cet effort correspondrait à une hauteur de remblai de l'ordre de 10 m, que l'on pourrait corriger à 14 ou 15 m en raison de la forme pyramidale du tas. Selon les mesures de contraintes, cet effort a été atteint pour une hauteur de couverture de l'ordre de 9,5 à 10,5 m; il a été ultérieurement dépassé de 60 à 70 %.

On peut citer les causes probables et non exhaustives de cette absence de fonctionnement l'altération des surfaces au cours des six mois d'arrêt du chantier lorsque la couverture n'était que de 8 m et l'existence d'une courbure accentuée ($R = 1,25$ m) alors que l'essai en laboratoire avait été fait sur éprouvette droite.

Quoi qu'il en soit, les moyens ont manqué pour déclencher le fonctionnement des dispositifs contractables et pour vérifier ainsi le report de charges mis en évidence par le calcul aux éléments finis.

6.4. Déformations transversales

Selon les relevés et les calculs subséquents, la déformation finale de la buse n° 0 est de - 18 mm, à laquelle il convient d'ajouter quelques 5 mm de déformation négative.

Le raccourcissement total du diamètre vertical à partir d'une hauteur de couverture nulle jusqu'à la couverture maximale de 15 m est donc:

$$- 5 \text{ mm} - 18 \text{ mm} = - 23 \text{ mm}.$$

C'est ce chiffre qu'il convient de rapprocher des résultats des différents calculs tendant à prédire un taux d'aplatissement.

Selon l'hypothèse du calcul ARVAL, la déformation de la buse est égale ou voisine du tassement du remblai technique ou latéral au niveau de la clé; le calcul tel quel ne pouvait s'appliquer à cet ouvrage expérimental car il aurait indiqué un module élastique nettement plus élevé que celui du remblai de Dourdan. Rappelons que celui-ci a été construit exprès, sans aucun compactage, en raison de la grande raideur naturelle du matériau utilisé, afin de porter le taux de déformation de la buse à un niveau suffisant pour une étude commode des phénomènes. En appliquant cette hypothèse pour 15 m de couverture, nous avons:

$$\lambda.H = 17 \times 15 = 255 \text{ kPa}$$

Après une correction pour forme pyramidale, on obtiendrait :

$$\sigma = 142,5 \text{ kPa}$$

Le modèle élastique étant $E_s = 14 \text{ MPa}$ on obtient :

$$\varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\phi} = \frac{142,5}{14\,000} = 0,0102 \text{ (ou } 1,02\% \text{)}$$

$$\Delta\phi = 0,0101 \times 2,5 = 0,0255 \text{ m (ou } 26 \text{ mm env.)}$$

D'après l'hypothèse ARVAL, on trouverait donc une déformation légèrement supérieure à la déformation réellement mesurée sur la buse n° 0. En d'autres termes, celle-ci serait légèrement plus raide que le remblai avoisinant.

6.5. Contraintes dans le remblai

L'allure des courbes montre que l'accroissement de contrainte commence par suivre celui du produit $\gamma.H$; en d'autres termes, la totalité du poids des terres installées au-dessus de la buse commence par reposer sur celle-ci.

A partir d'une certaine hauteur de couverture (ici 3 m environ) la pression mesurée devient plus faible que le produit $\gamma.H$ et cet affaiblissement augmente avec la hauteur de couverture.

Rapprochant ce phénomène de l'évolution de la forme du tas qui est d'abord trapézoïdale, puis de plus en plus pyramidale, on peut en déduire que l'existence de talus à proximité des buses exige une correction de la pression par rapport au produit $\gamma.H$ couramment utilisé dans les calculs. Dans le cas général, les buses se trouvent installées sous deux talus reliés par une plate-forme plus ou moins large selon l'importance de la voie: dans le cas de Dourdan, il faut tenir compte de deux autres talus qui donnent au tas la forme d'une pyramide tronquée, ce qui expliquerait la faiblesse relative des mesures de pression.

Cet effet justifie la pratique qui consiste, dans certains cas d'ouvrages de grande longueur, à calculer des épaisseurs qui vont en décroissant depuis le centre de la buse (au droit de la plate-forme) jusqu'aux extrémités qui peuvent être considérées comme non — ou peu — chargées à la clé. Cet effet explique également pourquoi, dans certains calculs, un coefficient atténuateur relié à la hauteur de couverture est introduit; toutefois, il conviendrait alors de tenir compte de la largeur de la plate-forme, le centre de la buse étant d'autant plus chargé qu'il est plus éloigné des talus.

6.6. Contraintes dans le métal

La faible variation des valeurs de la contrainte normale à la section droite, sur la périphérie des buses, pour une hauteur de couverture donnée, justifie substantiellement la théorie de White-Layer dite « de l'anneau comprimé » [1].

Les variations relevées peuvent provenir d'une part de la raideur propre de la buse (ici la raideur est forte sans excès) et, d'autre part, des frottements du remblai sur la buse. Le premier facteur n'expliquerait qu'une faible différence, vu la faible déformation maximale des ouvrages; au contraire, le second facteur pourrait expliquer l'accroissement constant (de 87 à 135 MPa) des contraintes σ_N dans la buse 0 et celui (de 102 à 142 MPa) des contraintes σ_N dans la buse 1; l'influence des frottements serait, dans ce cas, de l'ordre de 40 à 50% des contraintes normales minimales.

Si on choisit comme valeur σ_N le résultat de la mesure faite à la clé, on obtient respectivement 87, 102 et 129 MPa pour les buses n° 0, 1 et 2. Calculons pour la buse n° 0 de construction normale :

— la section unitaire de métal pour un coefficient de développement de 1,27 et pour une épaisseur de 2,5 mm :

$$S_u = 1,27 \times 0,0025 = 0,003175 \text{ m}^2/\text{m}$$

— l'effort normal périphérique unitaire :

$$N_u = 0,003175 \times 87 \times 10^6 = 276,225 \text{ kN/m}$$

— la pression au sommet par le quotient N/R :

$$P_s = \frac{276,225}{1,25} = 220,98 \text{ kPa/m}^2$$

— et enfin la hauteur non corrigée de couverture H_{nc} :

$$H_{nc} = \frac{220,98}{17} = 13 \text{ m}$$

En effectuant la même correction qu'au paragraphe D précédent pour la forme pyramidale du tas, on obtiendrait une hauteur corrigée de :

$$H_c = 13 \times \frac{255}{142,5} = 23 \text{ m de couverture.}$$

On en déduit que non seulement les contraintes normales sont significativement plus élevées que celles calculées par la méthode de l'anneau comprimé, mais qu'en outre, elle s'accroissent de l'effet des frottements du remblai sur la buse.

Celle-ci serait donc effectivement une inclusion un peu plus raide dans le remblai.

6.7. Contraintes de flexion

Le désir de maintenir à un niveau suffisamment bas le module élastique du remblai latéral avait conduit à déverser celui-ci du haut du chargeur (3 m) sans jamais faire circuler celui-ci à proximité immédiate de la buse. Cette mise en œuvre avait eu pour résultat un assez médiocre remplissage de l'espace compris entre la fondation et la partie basse de la buse, notamment sous le radier.

Ce défaut est assez courant sur les chantiers et la manière la plus sûre de l'éviter est de construire la

buse sur une fondation légèrement creuse, profilée pour épouser la partie basse de la buse et appelée «fondation en berceau». Il fut décidé de ne pas recourir à cette technique pour les buses expérimentées à Dourdan.

Les conséquences de ce défaut de remplissage furent l'apparition de quatre points supplémentaires de moment nul et un bouleversement considérable du diagramme de flexions par rapport au diagramme théorique à quatre points. Malgré ce fractionnement, amorce d'un flambement de degré plus élevé que la normale, les contraintes dues à la flexion dépassent couramment 50 % de σ_N en partie haute et moyenne; en partie basse, des dépassements de limite élastique se produisent et les contraintes de flexion y sont donc nettement prédominantes.

7. CONCLUSIONS

— Les buses métalliques mises à l'essai, bien que sous-dimensionnées en épaisseur, 2,5 mm au lieu de 4 mm selon la réglementation actuellement en vigueur [3] et bien qu'installées dans un remblai également sous-dimensionné au plan de la raideur, se sont parfaitement comportées sous une charge relativement forte.

On peut en déduire que les méthodes de dimensionnement en vigueur sont très prudentes [4]. Elles ne prennent notamment pas en compte la précontrainte négative due à l'installation dans les remblais techniques.

— Les buses métalliques mises à l'essai ont subi des plastifications partielles au niveau du radier et dans les parties latérales basses, qui n'ont pas affecté leur comportement. On peut en déduire que la sécurité est très suffisante lorsqu'on dépasse la limite d'élasticité du métal.

— Les mesures des déformations et des contraintes confirment les résultats numériques des calculs par éléments finis, à savoir que la buse métallique, tant qu'elle reste peu déformée, constitue une inclusion raide dans son remblai.

— Les mesures de contraintes de compression montrent que la valeur de σ_N varie peu le long de la périphérie des buses mises à l'essai, ce qui valide la pertinence de la théorie dite «de l'anneau comprimé».

— Toutefois, si l'on tient compte des frottements du remblai sur la buse et éventuellement d'un effet de voûte «à l'envers» longitudinal (dû au fait que les tronçons expérimentaux avaient une longueur limitée), cette théorie mériterait d'être perfectionnée. En outre, un calcul simple de la déformation tolérable au plan de la flexion permettrait de définir le module élastique E' du remblai technique.

— Les déformations des buses d'essai ont montré la pertinence de l'hypothèse ARVAL liant le taux d'aplatissement de la buse au taux de tassement du remblai technique.

Si cette hypothèse se trouvait définitivement confirmée pour les déformations faibles (1 à 2 %), on aurait ainsi un moyen simple de calcul.

— Les mesures de contrainte en fibre extrême ont montré l'importance relative de la flexion par rapport au niveau de σ_N , même pour des taux de déformation très faibles, inférieurs à 1 %.

Peu de chercheurs se sont penchés sur le phénomène le plus simple, c'est-à-dire la flexion qui se manifeste au cours des premiers stades de déformation que l'on analyse par le calcul aux éléments finis et dont l'effet entraîne couramment des fissurations, des ruptures de joints et même, le cas échéant, l'effondrement d'un ouvrage. L'accent a été mis très souvent sur le phénomène de flambement car il est plus accessible au calcul explicite. Le phénomène de flambement ne se produit cependant que dans des conditions extrêmes: ouvrage très flexible, très grands rayons de courbure, etc.

— Le chantier expérimental de Dourdan illustre l'intérêt des fondations profilées en berceau et souligne les conséquences d'une installation sur fondation plate et du mauvais remplissage sous les reins de la buse, qui en est généralement la conséquence.

Remerciements

Les auteurs remercient M. PRUDHOMME, les collaborateurs de la Société Cofiroute de leur soutien à la réalisation de cette expérimentation inédite, MM. BIGOT, DEPRESLE, SMIRR du Laboratoire de l'Est Parisien (Centre de Melun), JUBLIN du Laboratoire Central de leur participation.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] WHITE, H.L.; LAYER, J.P. (1960). — *The Corrugated Metal Conduit as a Compression Ring*. Proc. Highway Research Board, vol. 39, p. 389-397.
- [2] LUONG, M.P. (1981). — *Comportement mécanique des ouvrages placés dans les remblais*. Actes Séminaire «Interactions Sol-Structure», C.I.S.C.O., St-Rémy-les-Chevreuse, juin 1981.
- [3] L.C.P.C.-S.E.T.R.A., (1981). — *Buses métalliques - Recommandations et règles de l'Art*. Direction des Routes et de la Circulation Routière, Paris.
- [4] A.I.S.I., (1971). — *Handbook of Steel Drainage and Highway Construction Products*. 2^e édition.