



Cerema



Journée technique

LES BUSES METALLIQUES

Présentation générale et fonctionnement

Benoît POULIN

Cerema Ouest

Les buses métalliques
Nantes – 4 octobre 2018

Historique

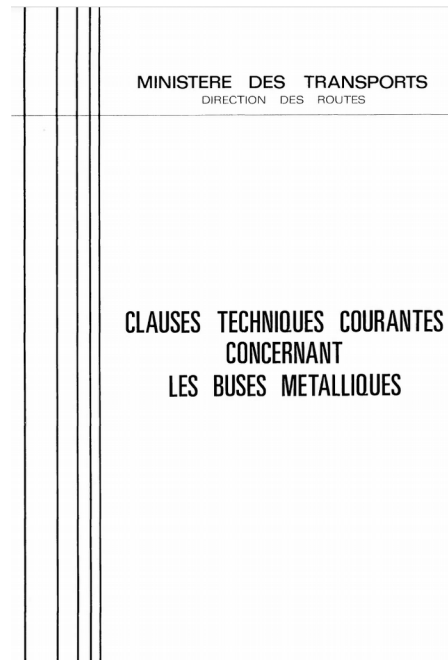
- Premier brevet en 1896 (M. Simpson) pour une buse préfabriquée en usine en acier ondulé flexible (USA)
- La société ARMCO, créée en 1899, exploite ce brevet dès 1908
- 1955 premier document « Handbook of Culvert and drainage Practice » par ARMCO International
- 1964-1970 amélioration des méthodes de calcul, dossier pilote OHAP ab64 – Aqueducs préfabriqués en acier – SETRA
- 1970-1978 recommandations provisoires, notes d'information SETRA
- A l'époque, nombreux désordres survenus en cours de construction, effondrement de certains ouvrages, surenchère des fabricants...

Bibliographie

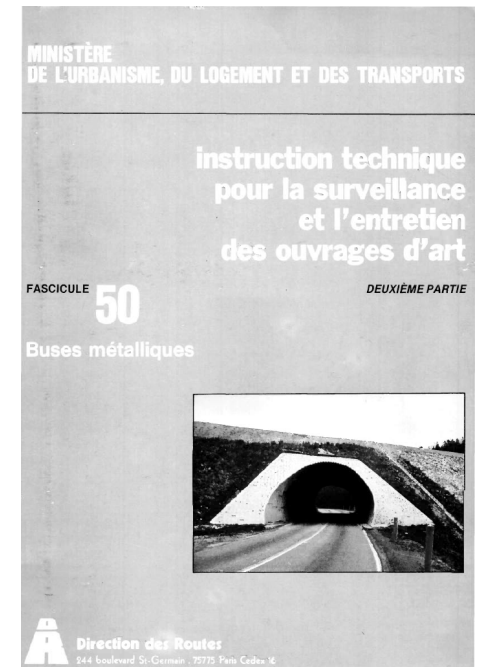
1981



1982



1985

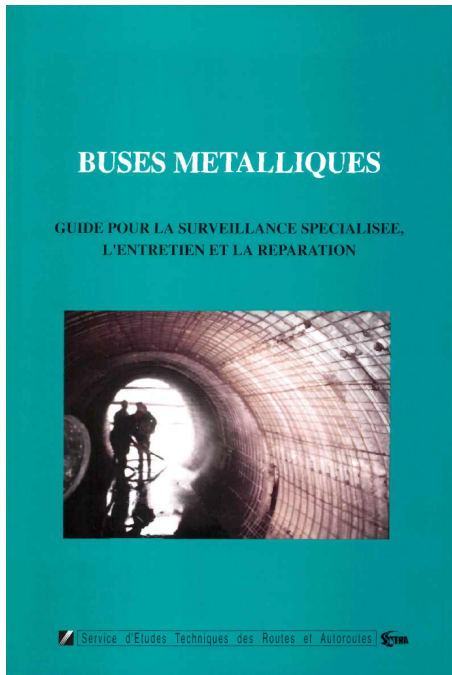


+ mises à jour 1982, 1985

+ rapports LCPC 1983, 1985, 1987

Bibliographie

1992



1996



ÉQUIPEMENTS, ENTRETIEN

Analyse des risques appliquée aux buses métalliques

Jean-Claude Hippolyte, Jacques Billon

Introduction

Ce n'est qu'en 1955 qu'un premier document sur

2009 : BOA n°61

2015



Analyse des risques appliquée aux buses métalliques



Collection | Références

Service des ouvrages d'art
Sétra

Un retour d'expérience en cours...

Fournisseurs

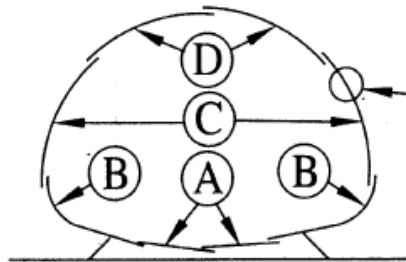
Trois principaux fournisseurs

- **ARMCO**, installé en Allemagne depuis 1956, et devenu HAMCO DINSLAKEN BAUSYSTEME GMBH en 1988 → depuis 1999, société SIREB représentant exclusif en France des produits HAMCO
- **TUBOSIDER** (Italie) depuis les années 1970 et toujours commercialisée
- **ARVAL** : produits à partir des années 1970 ; ne sont plus distribuées aujourd'hui

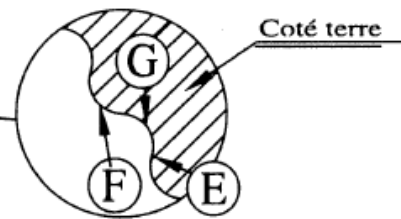
Morphologie

CONSTITUTION

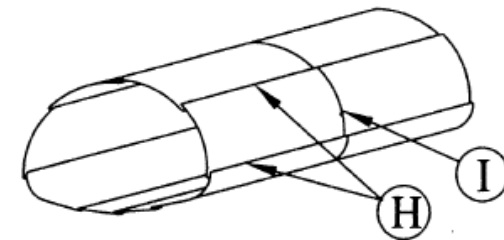
PLAQUES



ONDES



JOINTS



Ⓐ Plaques de radier
Ⓒ Plaques latérales

Ⓑ Plaques de coin
Ⓓ Plaques de sommet

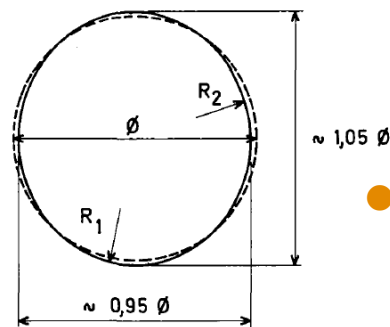
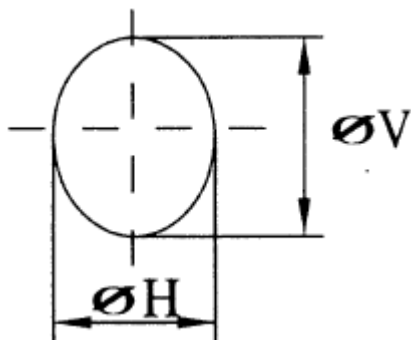
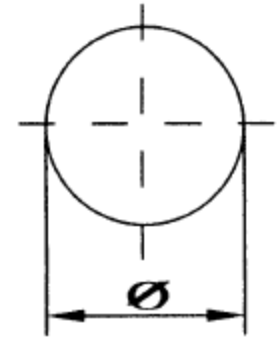
Ⓔ Flanc
Ⓕ Creux
Ⓖ Sommet

Ⓗ Longitudinaux
Ⓘ Circonférentiels

Morphologie

Section droite

- **Circulaire** : première forme utilisée et la plus courante, classiquement jusqu'à 8 m d'ouverture (comportement mécanique optimal)

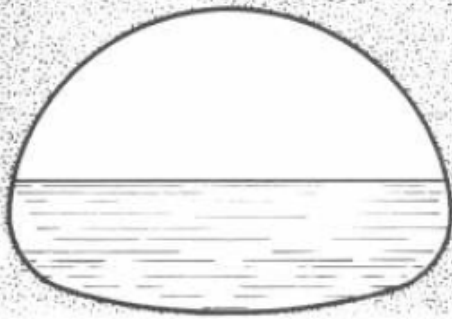
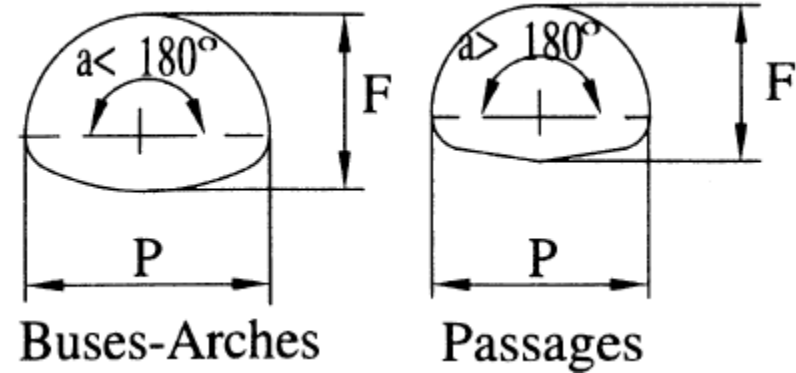


- **Elliptique à grand axe vertical**

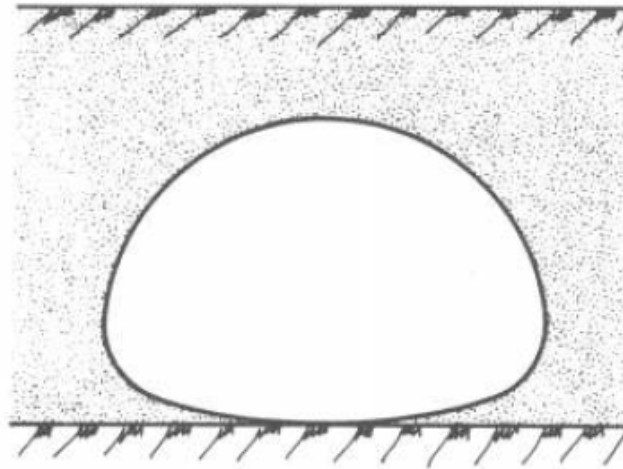
Morphologie

Section droite

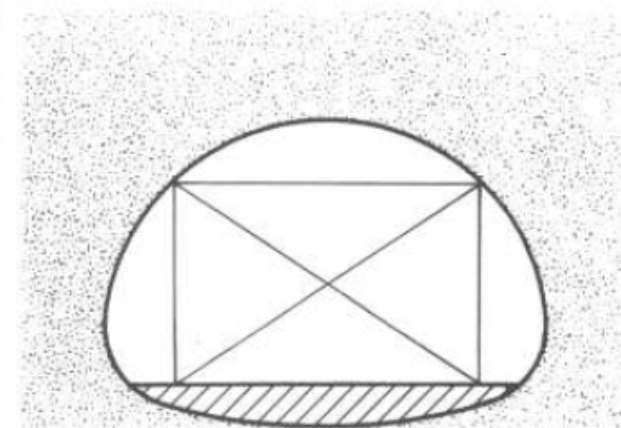
- **Buse-arche** : intérêt fonctionnel d'une forme surbaissée (portée jusqu'à 12 m)



Débit élevé pour faible hauteur d'eau



Ouverture importante pour faible hauteur de remblai

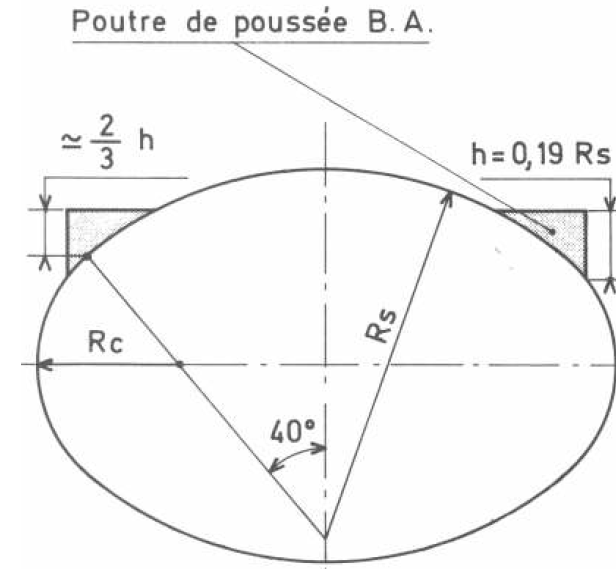


Possibilité d'inscrire un gabarit plus large que haut

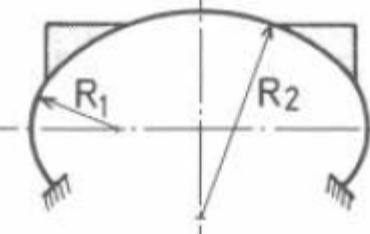
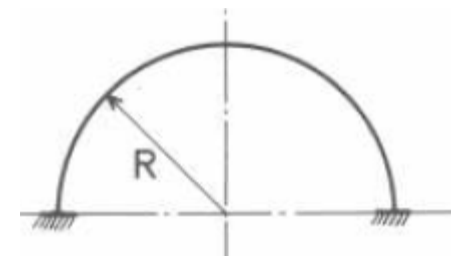
Morphologie

Section droite

- **Elliptique à grand axe horizontal**
(grande portée jusqu'à 13 m ou faible h remblai)



- Arche mixte : voûte métallique sur radier ou piédroit béton (grande portée)



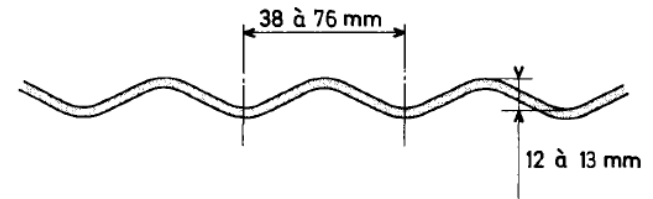
Les buses métalliques

Morphologie

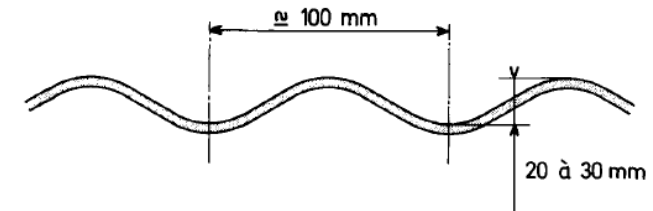
Ondulations

- Les caractéristiques mécaniques de la paroi dépendent directement de la géométrie des ondes et de l'épaisseur
- Petites ondulations jusqu'à 2 m de portée
- Grandes ondulations à partir de 4 à 5 m
- Ondulations pour conférer l'inertie nécessaire pendant les phases de construction, la résistance au flambement et lorsque faible hauteur de couverture

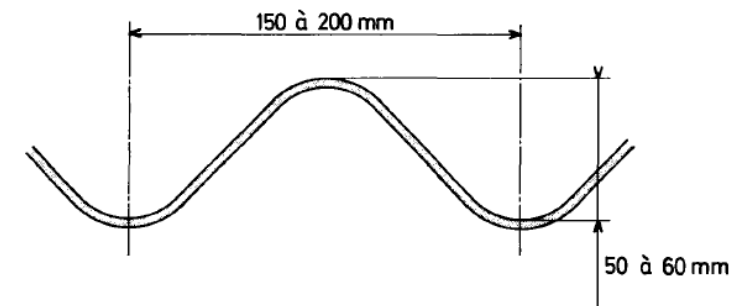
a) Petites ondulations



b) Ondulations intermédiaires



c) Grandes ondulations

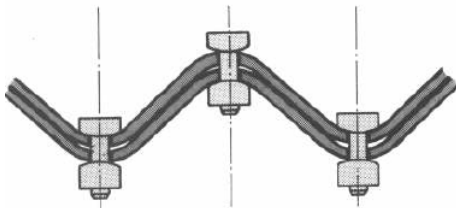


Morphologie

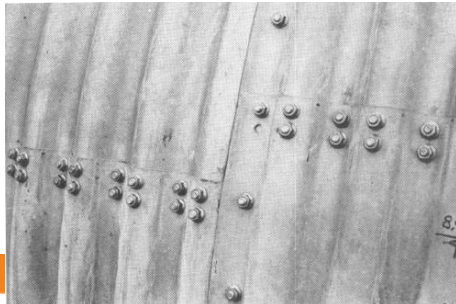
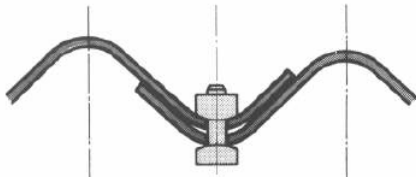
Joints

- Assemblage à recouvrement boulonné (le plus courant et quasi exclusif pour les diamètres supérieurs à 2–3 m)

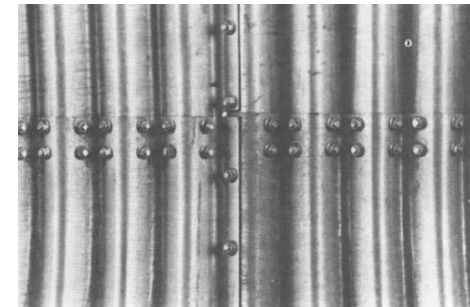
Joint longitudinal



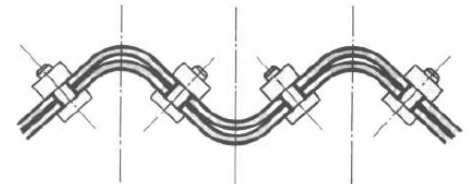
Joint circconférentiel



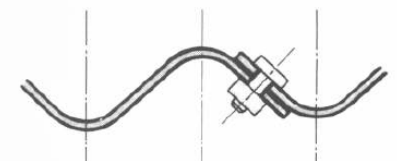
Boulons en sommet et creux d'onde (ARMCO, Tubosider)



Joint longitudinal



Joint circconférentiel



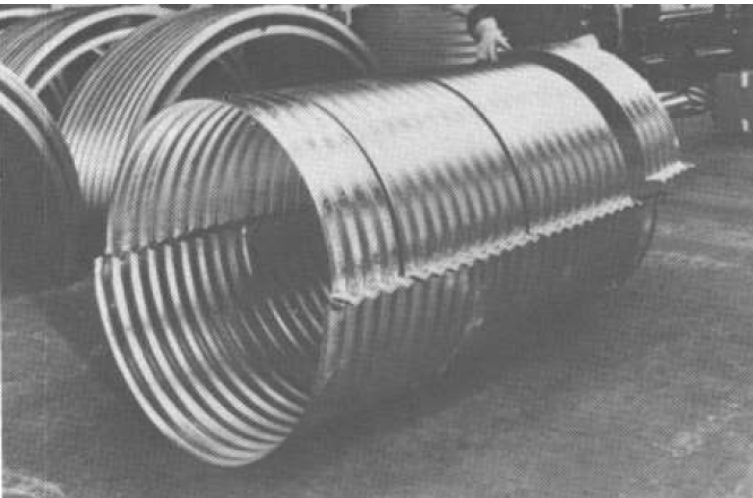
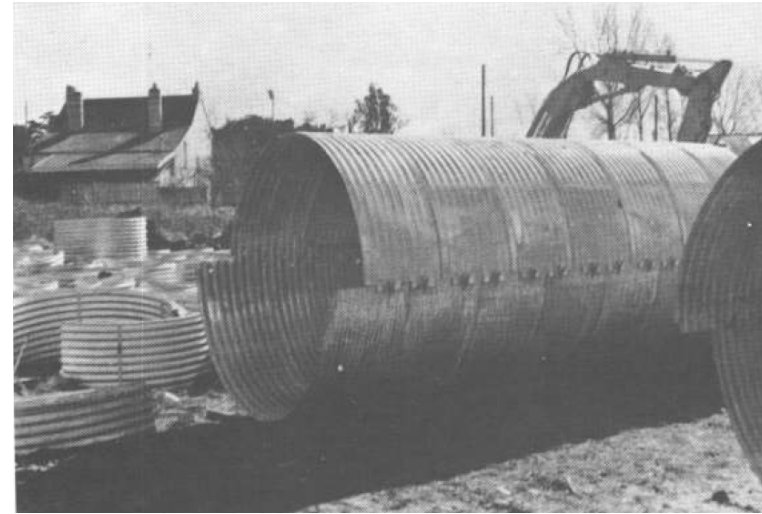
Boulons en flanc d'onde (Arval)

Morphologie

Joints

- Autres types de joints

Joints à encoches
(emboîtement, agrafage ;
portée < 2m)



Joints à oreille (portée < 2m)

Durée de vie

Guide de 1981 → vise une durée de vie de 70 ans

Mais buses construites avant : les documents des fabricants spécifiaient que les buses métalliques constituaient des ouvrages provisoires, avec une durée de vie estimée à 35 ans

Retour d'expérience : durée de vie observée plutôt de 50 ans en moyenne, parfois moins (certaines BM HS au bout de 35 ans).

La plupart des buses métalliques ont été construites dans les années 1960 et 1970 pour la réalisation des grandes infrastructures routières → pathologies de plus en plus fréquemment rencontrées

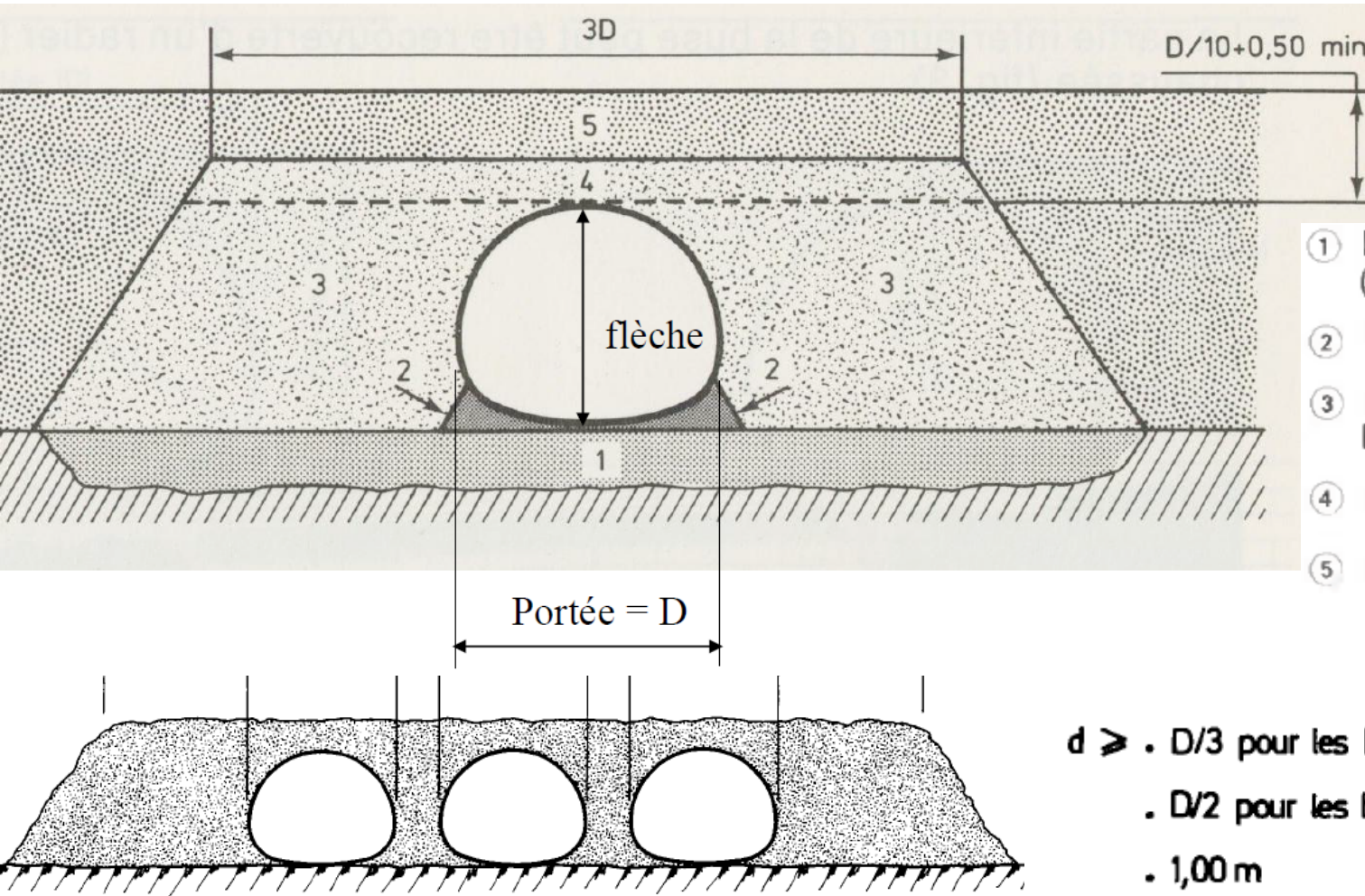
Fonctionnement

Le fonctionnement d'une buse métalliques résulte de l'association de deux milieux, mécaniquement indissociables

- Les terres environnantes :
 - Fondation
 - Remblais latéraux
 - Couverture
- Le coffrage métallique de la buse (destiné à réorienter les contraintes dans le massif de sol, peu de résistance intrinsèque)

Importance particulière des remblais latéraux de butée sur le fonctionnement global de l'ouvrage

Fonctionnement



- ① Fondation artificielle (éventuellement).
- ② Remblais de calage.
- ③ Massifs latéraux de butée.
- ④ Dôme de protection.
- ⑤ Remblais généraux.

- $d \geq \cdot D/3$ pour les buses-arches
- $\cdot D/2$ pour les buses circulaires
- $\cdot 1,00 \text{ m}$

Comportement

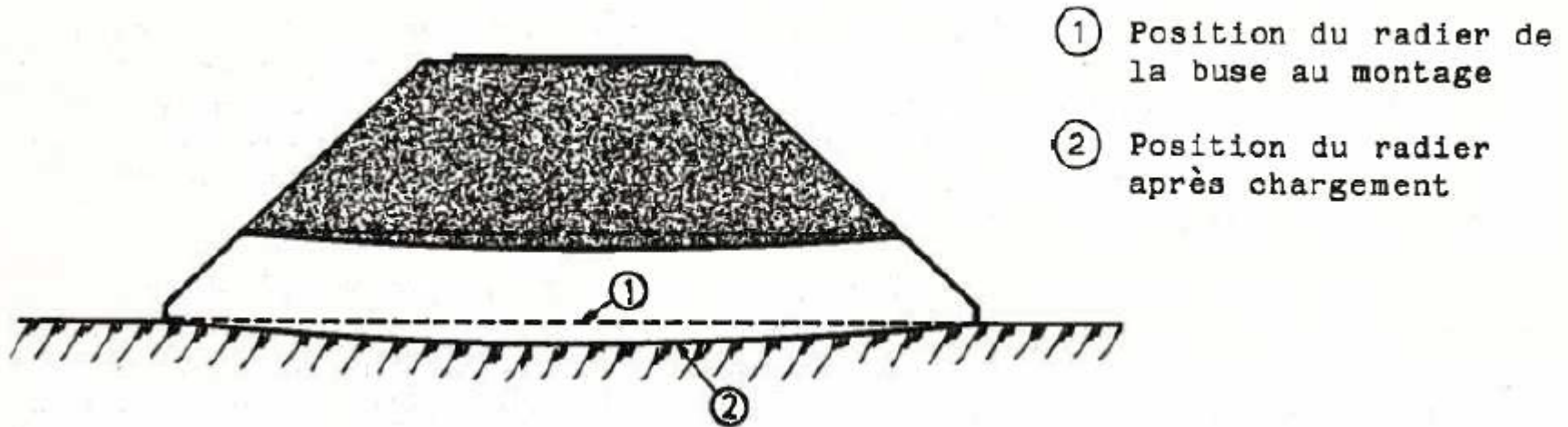
En cours de construction

- Faible rigidité, et donc grande déformabilité des tôles
- Nécessité de mettre en œuvre les remblais de butée de manière symétrique de part de d'autre de la buse, avec compactage par couches successives de hauteur limitée à 25-30 cm
- Certaines buses étaient montées par des entreprises de terrassement, ne respectant pas nécessairement le phasage de montage des remblais...

Comportement

Longitudinal

- Grande souplesse longitudinale,
- Adaptation aux tassements différentiels (sauf arches mixtes)
→ ouvrage bien adapté dans le cas de sols compressibles

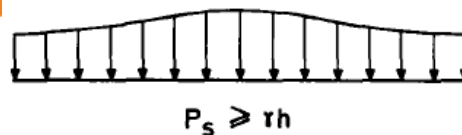
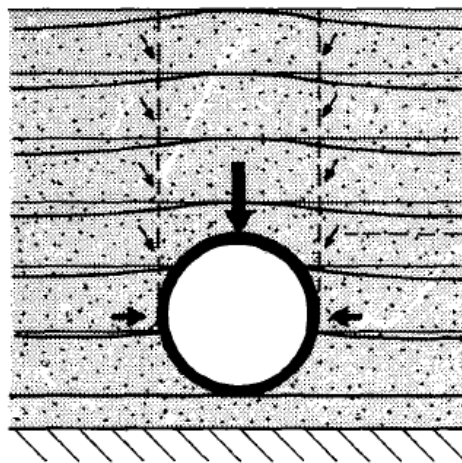


Comportement

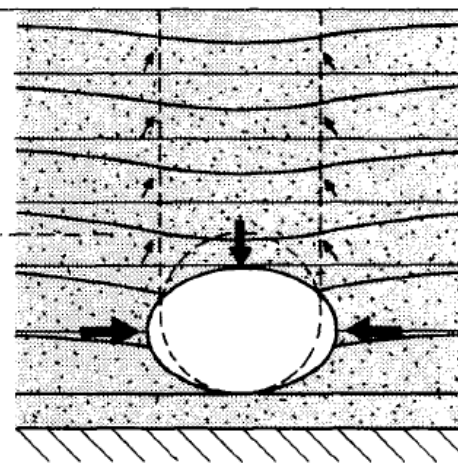
Transversal

- Souplesse transversale
- Mobilisation de la butée latérale du sol
- Nécessité d'une raideur suffisante et homogène des remblais environnants

Ouvrage rigide



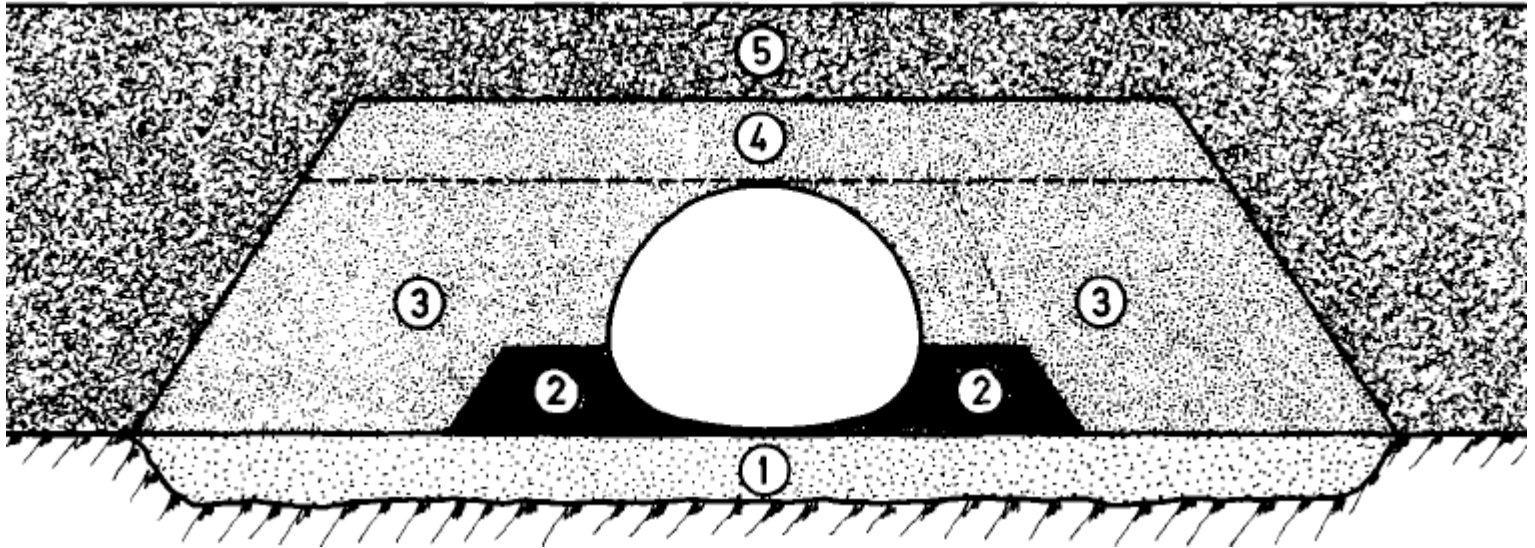
Ouvrage souple



Comportement

Transversal

- Qualité des remblais techniques et phasage de réalisation



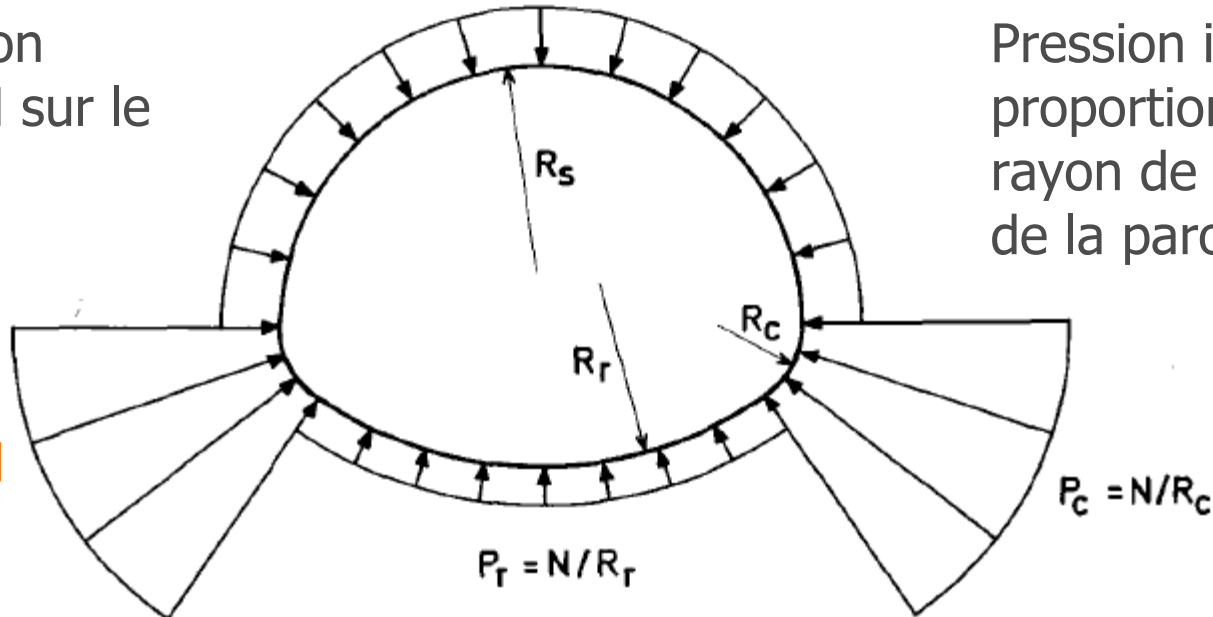
- ① fondation artificielle (éventuellement)
- ② banquette latérale éventuelle
- ③ remblais latéraux de butée
- ④ dôme (ou matelas) de couverture
- ⑤ terrassements généraux

Comportement

Transversal

- Fonctionne principalement en compression, flexion limité
- Risque d'instabilité
- Nécessité d'une hauteur de couverture suffisante (diffusion des charges, fonctionnement en anneau comprimé)

Compression
uniforme N sur le
pourtour



Pression inversement
proportionnelle au
rayon de courbure
de la paroi

Principe des justifications

- Pression P_s étant supposée connue, on détermine l'effort de compression N dans la paroi → on en déduit les pressions P appliquées au terrain en chaque point, connaissant les rayons de courbure de la buse
- Combinaison de calcul à l'ELU

$$S_c = \gamma_{F3} S(\gamma_{F1G} \cdot G + \gamma_{F1Q} \cdot Q)$$

où G désigne l'ensemble des actions permanentes et Q l'action variable de base considérée (charges d'exploitation)

Principe des justifications

- Calcul de la poussée P_s au sommet de la buse (à la clé)

$$P_s = P_s (\gamma_{F1G} \cdot G + \gamma_{F1Q} \cdot Q)$$

$$\gamma_{F1G} = 1,2$$

$\gamma_{F1Q} = 1,42$ pour les charges routières sans caractère particulier

$\gamma_{F1Q} = 1,2$ dans le cas des convois militaires et des convois exceptionnels

- Pression due au poids des terres

$$P_{SG} = \gamma_{F1G} \gamma h = 24 h$$

h : hauteur de couverture de remblai

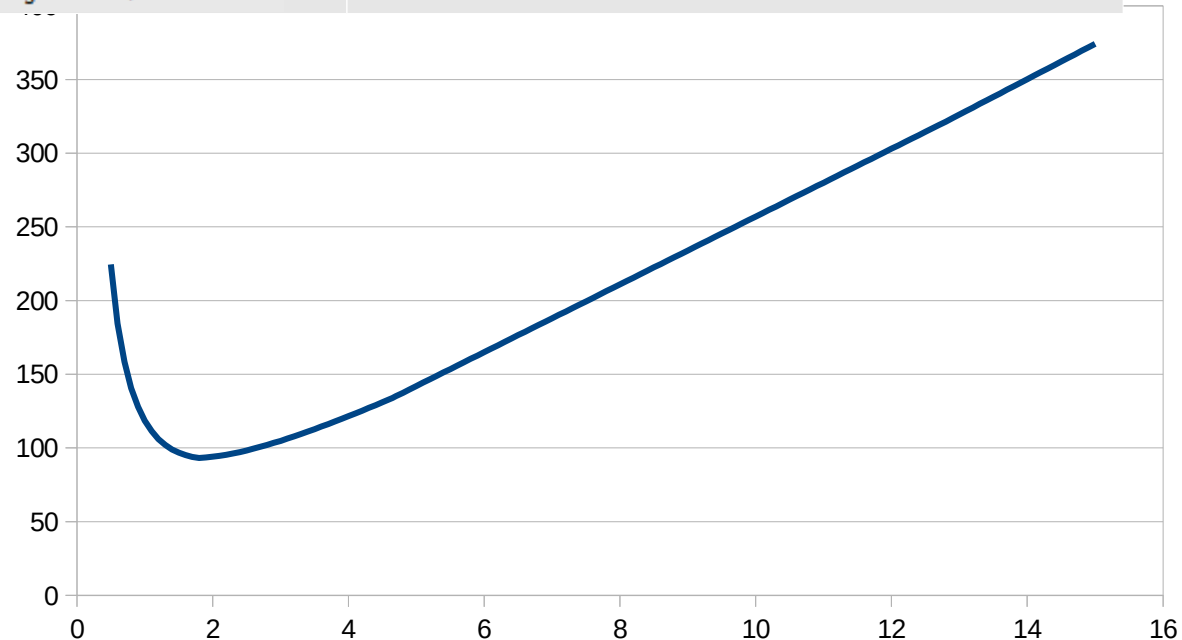
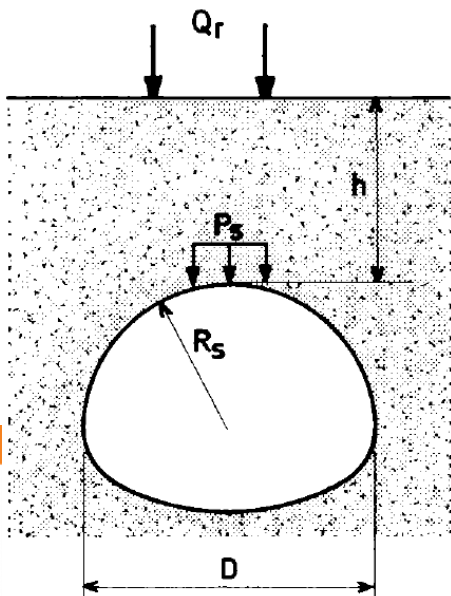
Principe des justifications

- Pression due aux charges d'exploitation

h (m)	$P_s = S (Y_{F1Q} \cdot Q)$ (kPa)	Type de charge	Observations
0,5	238,2	B_r	Compte tenu des valeurs adoptées pour les coefficients Y_{F1Q} , les charges de caractère exceptionnel prises en compte ici ne sont jamais prépondérantes.
1,0	87,2	B_c	
1,5	61,7	B_t	
2,0	48,6	"	
2,5	38,3	"	
3,0	31,0	"	
3,5	25,6	"	
4,0	23,6	A(1)	
5,0	21,7	"	
6,0	20,2	"	
7,0	18,9	"	
8,0	17,8	"	
9,0	16,8	"	
10,0	15,9	"	
11,0	15,2	"	
12,0	14,2	1 t/m ²	

Principe des justifications

Pression (en kPa)	Hauteur de remblai (en m)
$P_s = \frac{85}{(h-0,1)} + 24h$	$0,5 \leq h \leq 1,80$
$P_s = \frac{115}{(h+0,5)} + 24h$	$1,8 \leq h \leq 4,65$
$P_s = 27 + 23h$	$4,65 \leq h \leq 12,80$
$P_s = 14,2 + 24h$	$12,80 \leq h$



Principe des justifications

- Justification à l'ELU de résistance à la compression des parois
 $N = \max (P_s.R_s ; P_s.D/2)$
 - R_s : rayon de courbure des plaques du sommet
 - D : portée de la buse

$$N_u = \gamma_{F3} N, \text{ avec } \gamma_{F3} = 2 \text{ (moments de flexion négligés)}$$

$$N_u \leq R_{pc} / \gamma_m$$

R_{pc} : résistance à la rupture en compression de la paroi avec son épaisseur de calcul e_c

$$\gamma_m = 1,65 \text{ ou } 1,5 \text{ selon importance de l'ouvrage}$$

→ **fixe l'épaisseur minimale de la tôle**

$$\begin{array}{l} \bullet \text{ 3 boulons/onde} \\ \left\{ \begin{array}{ll} e = 1 + \frac{R_p}{500} & 0 \leq R_p \leq 500 \text{ kN/m} \\ e = 0,9 + \frac{R_p}{455} & 500 \leq R_p \text{ limité à 7 mm} \\ & \text{d'épaisseur nominale} \end{array} \right. \end{array}$$

Principe des justifications

- Epaisseur sacrifiée à la corrosion

$$e_0 = e_c + e_s$$

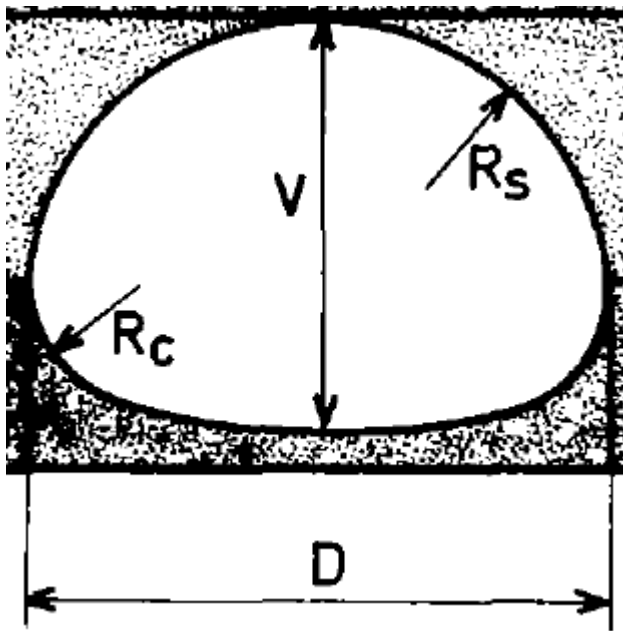
- e_0 : épaisseur nominale de la tôle
- e_c : épaisseur nominale de calcul
- e_s : épaisseur sacrifiée à la corrosion

$$e_s = e_a \text{ (côté air)} + e_r \text{ (côté remblai)}$$

- e_a : 0,25 à 0,75 mm
- e_r : 0,50 à 1,0 mm

Principe des justifications

- Justification à l'ELU : instabilité de forme (inversion de courbure à la clé)
→ **fixe le module élastique requis pour les remblais de butée latéraux** (pour une paroi de caractéristiques données)



$$E_s = k \sqrt{\frac{N^3}{E_a I_c}} \quad k = \frac{42}{\sqrt{\left(\frac{V}{D}\right)^3}} \quad \left(\frac{V}{D}\right) \geq 0,6$$

Le produit $E_a I_c$ désigne la rigidité de la paroi sous son épaisseur de calcul e_c . Sa valeur est donnée par les fiches techniques

Les convois exceptionnels

- Difficulté pour les gestionnaires d'ouvrages de vérifier les buses métalliques sous le passage de convois exceptionnels
 - Démarche \pm empirique
 - Nombre d'essieux pouvant solliciter la buse en fonction de son ouverture D
 - Comparaison du tonnage des essieux du convoi au tonnage des essieux des camions Bc du règlement de l'époque de construction
 - Comparaison des charges réparties induites en surface par le convoi par rapport à celles des charges du règlement de construction
 - (peu ou) pas d'outils de calculs disponibles ou développés

Les convois exceptionnels

- Outil de calcul CONVOA du Cerema
 - Actuellement réservé aux services de l'État (forme d'acquisition pour les services hors Etat ?)
 - Modèle BUSE spécialement conçu (applique la méthode du guide SETRA 1981)
 - Limité aux buses construites après 1982 (post parution du guide de 1981)
 - Évalue un indicateur global de pression à la clé, à l'ELU (ELS implicitement vérifié du fait de la valeur adoptée sur le coefficient de sécurité pour la vérification à l'ELU)
 - Pression à la clé évaluée selon la méthode de Boussinesq

Les convois exceptionnels

- Sollicitation ultime de dimensionnement

$$P_{u, dim} = \gamma_{F3} \cdot P(\gamma_{F1G} \cdot G + \gamma_{F1Q} \cdot Q)$$

$$P_{u, dim} = 2 \times (1, 2 \times \gamma_{remblai} \times h + \gamma_{F1Q} \times P_Q)$$

- Sollicitation ultime due au convoi étudié

$$P_{u, convoi} = \gamma_{F3, réduit} \cdot P(\gamma_{F1G} \cdot G + \gamma_{F1Q, convoi} \cdot Q_{convoi})$$

$$P_{u, convoi} = \gamma_{F3, réduit} \times (1, 2 \times \gamma_{remblai} \times h + 1, 2 \times P_{Q, convoi})$$

$\gamma_{F3, réduit} = 2$ entre 0 et 2 m d'épaisseur de remblai

$\gamma_{F3, réduit} = 1,5$ au-delà de 4 m d'épaisseur de remblai

$\gamma_{F3, réduit}$ varie linéairement entre ces deux valeurs entre 2 et 4 m d'épaisseur de remblai.

Indicateurs CONVOA

$$I = \frac{P_{u, convoi}}{P_{u, dim}}$$

Satisfaisant	s'il est compris inférieur à 0,90
Limite	s'il est compris entre 0,90 et 1,00
Critique	s'il est supérieur à 1,00



Cerema

Merci de votre participation

Benoît Poulin

benoit.poulin@cerema.fr

02.40.12.83.88

www.cerema.fr

Cerema Ouest

Les buses métalliques
Nantes – 4 octobre 2018