

# Journée Technique

## Buses Métalliques

*Fonctionnement et dimensionnement*

Anthony HEKIMIAN - Cerema

---

# Sommaire

---

- Fonctionnement
- Comportement
- Principe des justifications
- Cas des convois exceptionnels
- Modélisation réservée à la réparation

# Fonctionnement

---

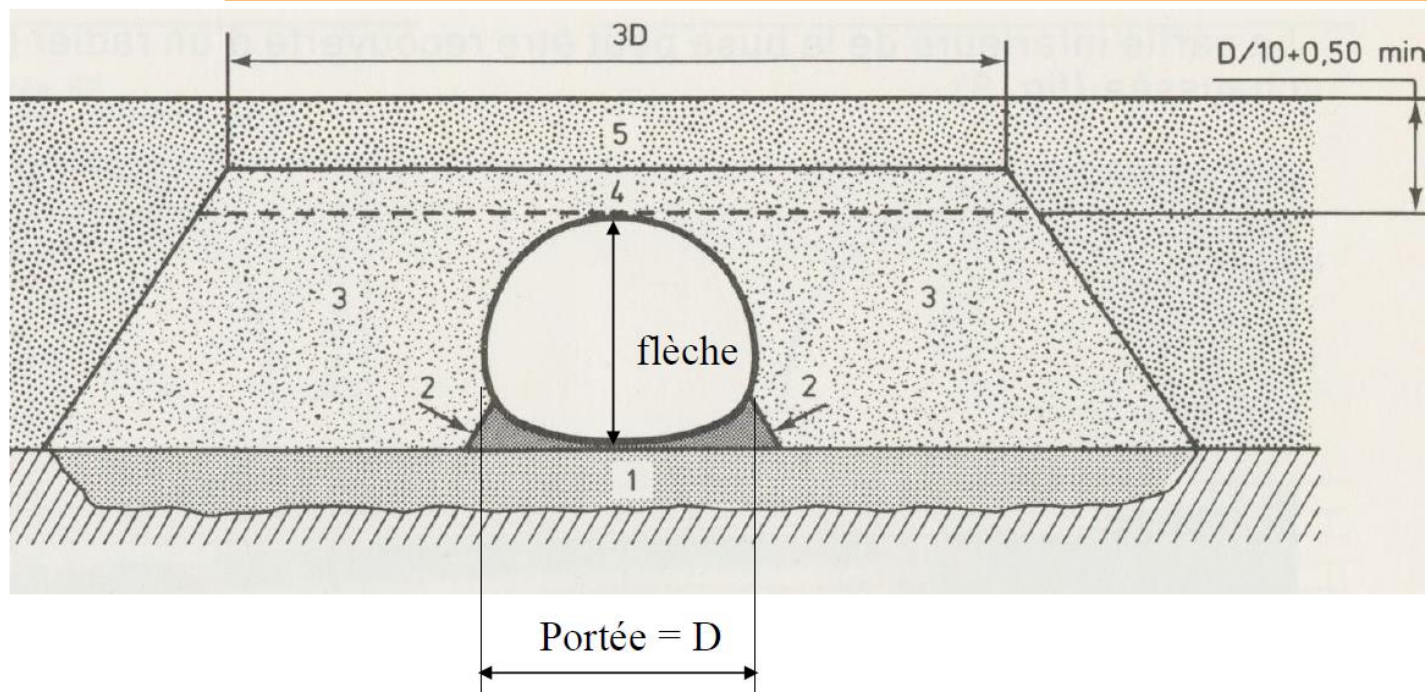
Le fonctionnement d'une buse métalliques résulte de l'association de deux milieux, mécaniquement indissociables :

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

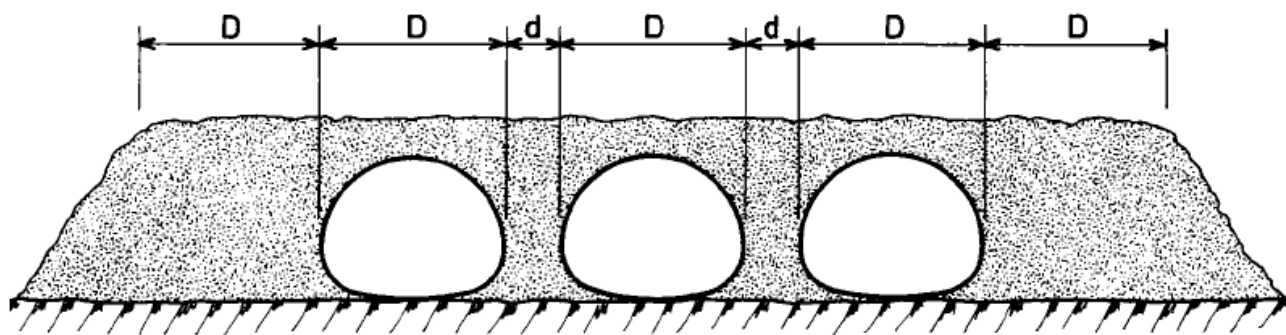


Importance particulière des remblais latéraux de butée sur le fonctionnement global de l'ouvrage

# 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
- $\cdot 1,00$  m

# Comportement

---

## En cours de construction

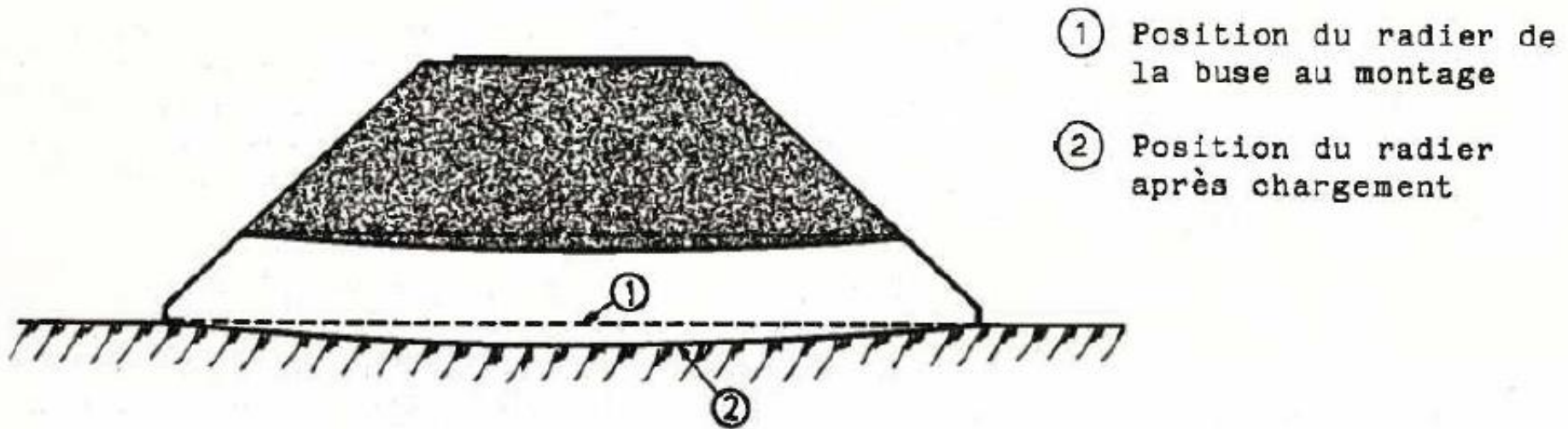
- Faible rigidité, et donc grande déformabilité des tôles
- Nécessité de mettre en œuvre les remblais de butée de manière symétrique de part et d'autre de la buse, avec compactage par couches successives de hauteur limitée à 25-30 cm
- Certaines buses ont été montées par des entreprises de terrassement,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

# Comportement

---

## Longitudinalement

- Grande souplesse longitudinale,
- Adaptation aux tassements différentiels  
→ ouvrage bien adapté dans le cas de sols compressibles

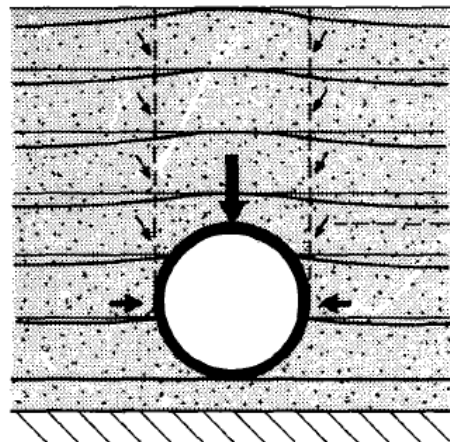


# Comportement

## Transversalement

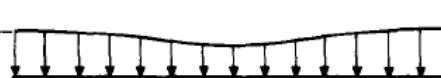
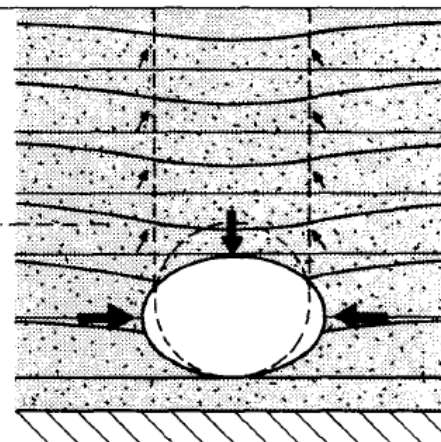
- Souplesse transversale
- Mobilisation de la butée latérale du sol
- Nécessité d'une raideur suffisante et homogène des remblais environnants

Ouvrage  
rigide



$$P_s \geq \gamma h$$

Ouvrage  
souple



$$P_s < \gamma h$$

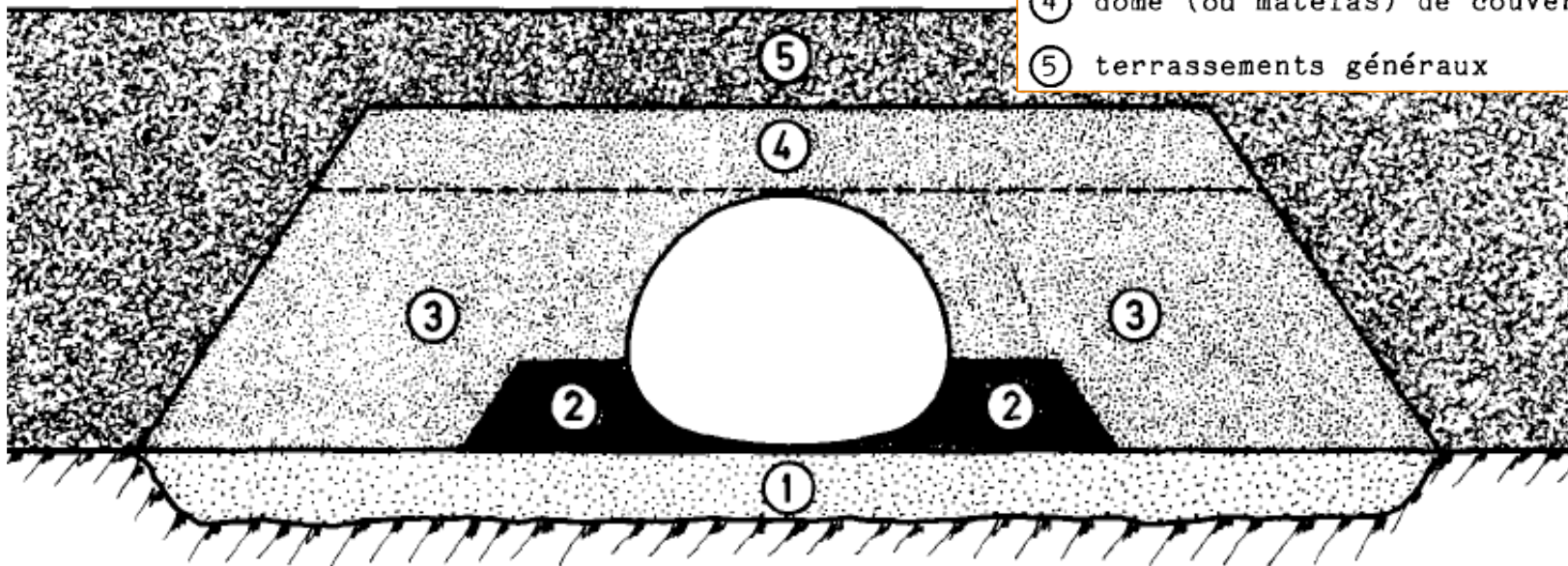


# Comportement

## Transversalement

- 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





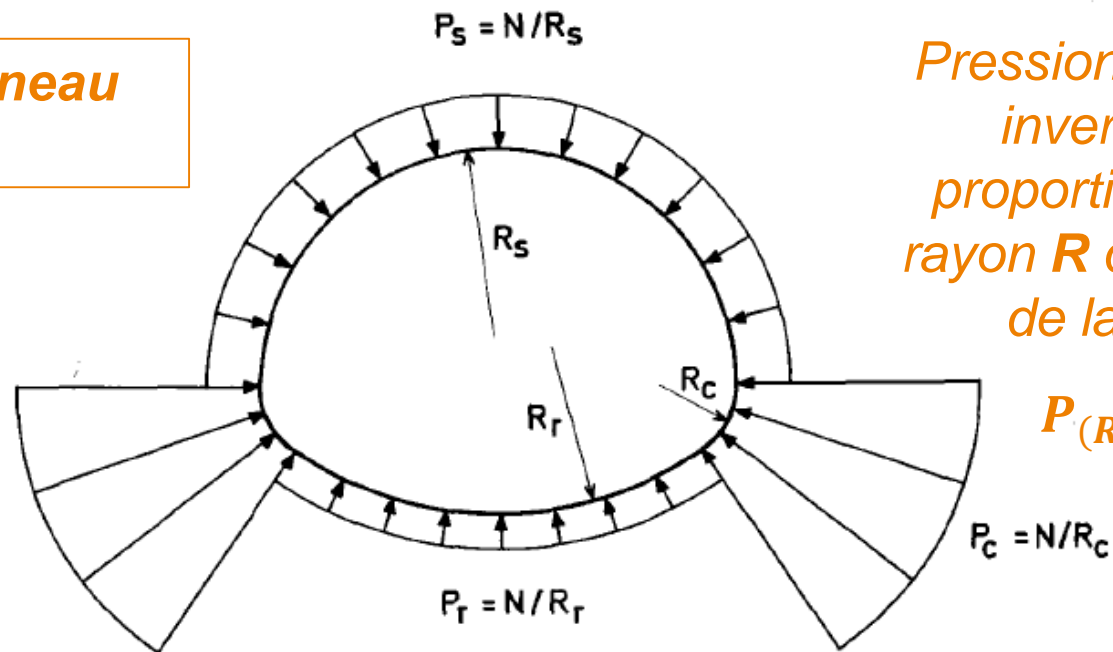
# Comportement

## Transversalement

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

### *Théorie de l'anneau comprimé*

*Compression uniforme  $N$  sur le pourtour de la buse*

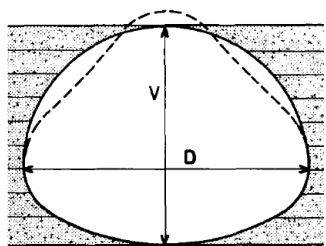


*Pression du sol  $P_{(R)}$  inversement proportionnelle au rayon  $R$  de courbure de la paroi :*

$$P_{(R)} = \frac{N}{R}$$

# Principe des justifications

- Objectif du recalcul :
  - Expliquer les désordres observés,
  - Anticiper leur évolution,
  - Evaluer les efforts en vue d'une mise en sécurité
- Limites d'emploi :
  - Absence de pathologie remettant en cause la théorie de l'anneau comprimé (exemple : corrosion localisée, inversion de courbure,...)
  - Connaissance des matériaux de remblai...
- Modélisation & critères de vérification :
  - Règles du guide « Buses métalliques » (SETRA, 1981) et ses mises à jour (1982, 1985)
  - Vérifications principalement en service



*Déformations pendant le remblaiement*



# Principe des justifications

---

- Pression  $P_s$  (pression au sommet ou à la clé) est supposée connue :
  - on détermine l'effort de compression  $N$  dans la buse
  - 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

Q l'action variable de base considérée (charges d'exploitation)

# Principe des justifications

---

- Calcul de la pression  $P_S$  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 aux charges permanentes (= poids des terres en général)

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

$\gamma \approx 20 \text{ kN/m}^3$  (poids volumique du sol)

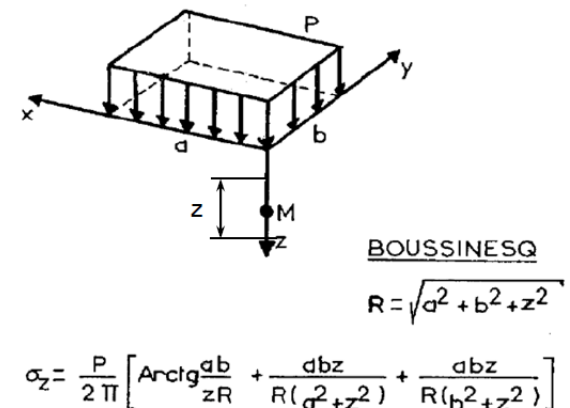
$h$  : hauteur de couverture de remblai

# Principe des justifications

- Calcul de la pression  $P_S$  au sommet de la buse (à la clé) :
  - Pression due aux charges d'exploitation

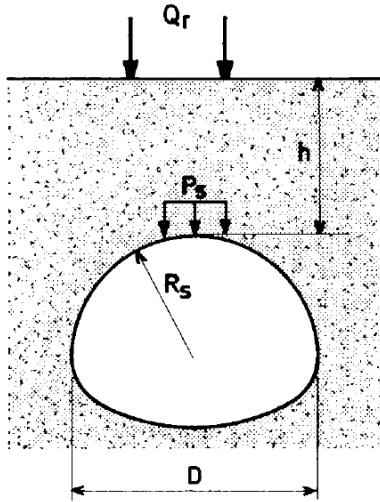
h (m)	$P_S = S (Y_{F1Q} \cdot Q)$ (kPa)	Type de charge	Observations
0,5	238,2	$B_r$	Compte tenu des valeurs adoptées pour les coefficients $Y_{F1Q}$ , les charges de caractère exceptionnel prises en compte ici ne sont jamais prépondérantes.
1,0	87,2	$B_c$	
1,5	61,7	$B_t$	
2,0	48,6	"	
2,5	38,3	"	
3,0	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 <sup>2</sup>	

- **Charges du F61 titre II**
- **Majoration dynamique**
- **Diffusion des charges suivant la méthode de Boussinesq :**



# Principe des justifications

— Calcul de la pression  $P_S$  au sommet de la buse (à la clé) :

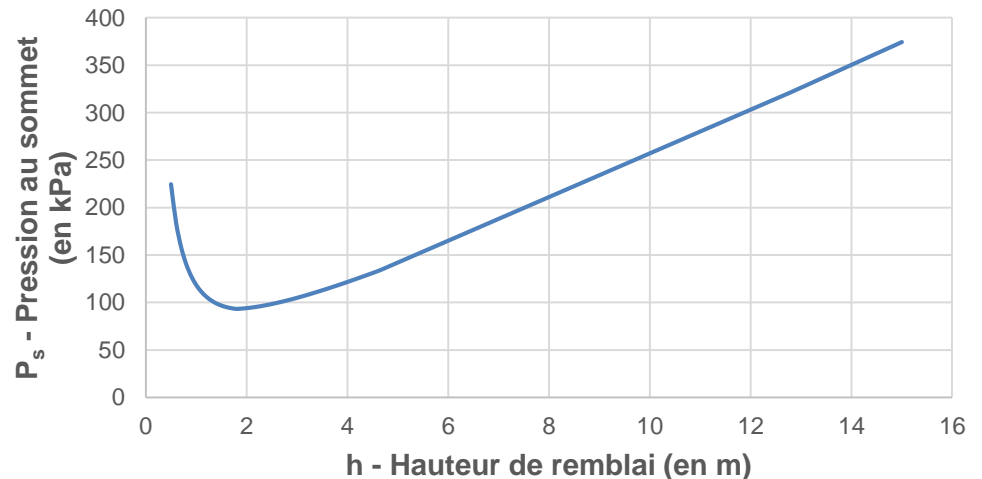


Pression (en kPa)	Hauteur de remblai (en m)
$P_S = \frac{85}{h - 0,1} + 24h$	$0,30 \leq h \leq 1,80$
$P_S = \frac{115}{h + 0,5} + 24h$	$1,80 \leq h \leq 4,65$
$P_S = 27 + 23h$	$4,65 \leq h \leq 12,80$
$P_S = 14,2 + 24h$	$h \geq 12,80$

$$H_{min} = \frac{D}{10} + 0,5m \text{ pour } D \geq 2m$$

$$H_{min} = \frac{D}{5} + 0,3m \text{ pour } D \leq 2m$$

$$H_{max} = 20 \frac{R_c}{R_S}$$





# Principe des justifications

— Critère ELU de **résistance à la compression** des parois

$$N = \max(P_S \cdot R_S ; P_S \cdot D / 2) \text{ et } N_u = \gamma_{F3} N$$

On doit vérifier :  $N_u \leq R_{pc} / \gamma_m$

- $R_S$  : rayon de courbure des plaques de sommet
- $D$  : portée horizontale de la buse
- $\gamma_{F3} = 2$  (car moments de flexion négligés)
- $R_{pc}$  : résistance à la rupture en compression de la paroi avec son épaisseur de calcul  $e_c$
- $\gamma_m = 1,5$  ou  $1,65$  (selon l'importance de l'OA)

⇒ *On obtient l'épaisseur minimale  $e_c$  à partir des fiches techniques des produits :*

Exemple ARMCO  
MP200

• 3 boulons/onde

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

# 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

$$e_s = e_r + e_a$$

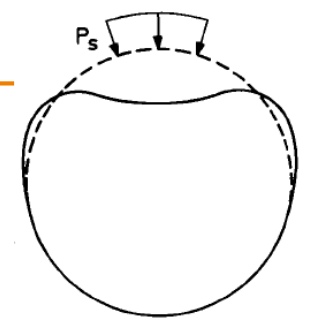
Réserve d'épaisseur  $e_r$  (mm) côté remblai

	OA ordinaire	OA de grande importance
Hors d'eau	0,50	0,75
En eau douce	0,75	1,00

Réserve d'épaisseur  $e_a$  (mm) côté atmosphère

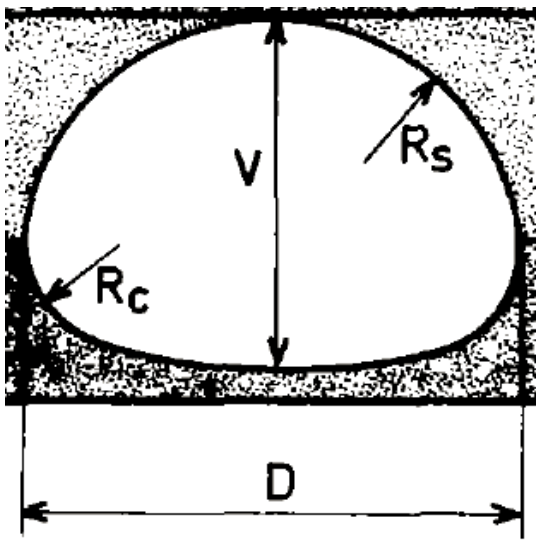
	Visitable	Non visitable
$SO_2 < 0,1\text{mg/m}^3$	0,25	0,50
$SO_2 \geq 0,1\text{mg/m}^3$	0,50	0,75

# Principe des justifications



— Critère ELU d'instabilité de forme (inversion de courbure à la clé)

⇒ On obtient le module élastique  $E_s$  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.
- $E_s$  de l'ordre de 40 à 80 MPa

# Principe des justifications

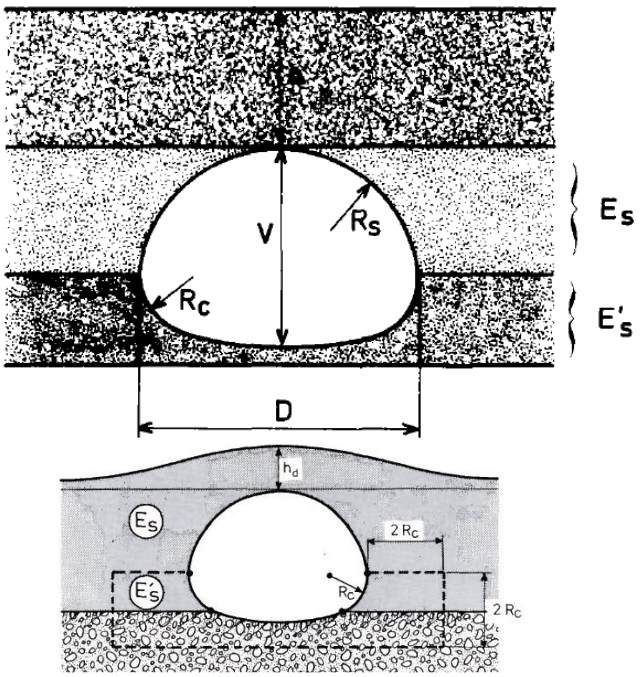
- Critère ELS de **déformation limite**  
(limitation des contraintes dans l'acier : 50%  $f_e$ )
- ⇒ *On obtient les modules élastiques  $E_s$  et  $E'_s$  requis pour les remblais de butée latéraux (pour une paroi de caractéristiques données)*

$$E_s \text{ (MPa)} \geq 1,5v_0 \left( 1 + \frac{h}{R_s} \right)$$

$v_0$  : distance de la fibre extrême à l'axe neutre pour l'épaisseur nominale (en cm) (cf. fiches tech.)

Pour les **buses arches**, sous les plaques de coin :

$$E'_s = \frac{R}{V-R} E_s \text{ avec : } R = \max \left( R_s ; \frac{D}{2} \right)$$



# 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  $B_c$  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'Etat (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

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

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

— Sollicitation ultime due au convoi étudié

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

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

$\gamma_{F3,réduit} = 2$  pour une épaisseur de remblai inférieure à 2 m

$\gamma_{F3,réduit} = 1,5$  pour une épaisseur de remblai supérieure à 4 m

$\gamma_{F3,réduit}$  varie linéairement entre ces 2 valeurs pour une épaisseur comprise entre 2 et 4 m

## Indicateur CONVOA

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

Satisfaisant

Si  $I < 0,90$

Limite

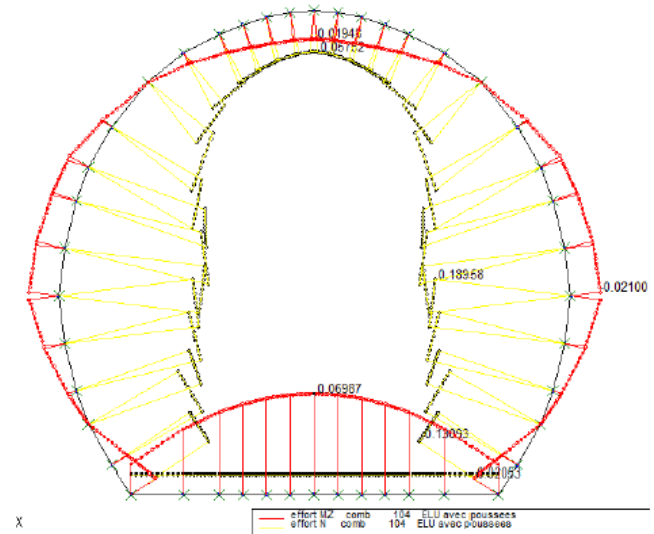
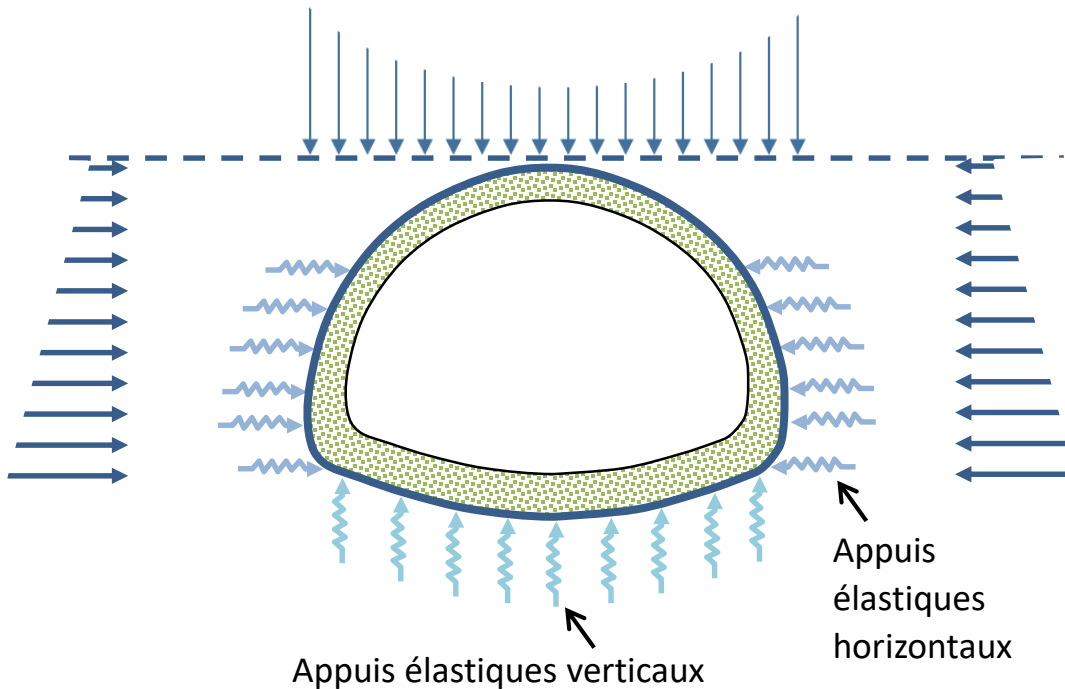
Si  $0,90 \leq I \leq 1,00$

Critique

Si  $I > 1,00$

# Méthodes de modélisation pour réparation

- Modélisation 2D à barres (ou 3D) avec prise en compte de l'interaction sol-structure
- Méthode déconseillée pour le calcul d'une buse souple (trop sensible) mais adaptée dans le cas d'un renforcement (chemisage tube PRV ou anneau BA...) plus rigide



⇒ On obtient les sollicitations *N*, *M* pour réaliser une vérification « classique »

# Merci de votre attention

**Anthony HEKIMIAN**

Division Ouvrages d'Art du Cerema Méditerranée

04 42 24 76 95

[Anthony.Hekimian@cerema.fr](mailto:Anthony.Hekimian@cerema.fr)

---