

Présentation de la nouvelle méthode ASCE MOP 145 pour le dimensionnement des liners circulaires et non-circulaires des conduites gravitaires

Olivier Thépot (France)
Consultant

Jadranka Simicevic (USA)
JPS Consulting

Introduction

- L'ASCE (Société Américaine des Ingénieurs en Génie Civil) a entrepris à partir de 2010 de publier une méthode de dimensionnement des close-fit liners pour les canalisations gravitaires sur la base des travaux les plus récents sur le sujet notamment :
 - Les publications du projet national RERAU (2000) et la méthode 3R2014 en France (2014)
 - Les expérimentations de I. Moore au Canada
- La méthode a été publiée en septembre 2021 dans le Manuel N°145 de l'ASCE (MOP 145)
- Elle est basée essentiellement sur la méthode Française ASTEE 3R2014 révisée en 2017.
- Elle apporte des améliorations à la méthode de l'ASTEE notamment la prise en compte des fissures pour les profils non-circulaires et l'extension des profils calculables.

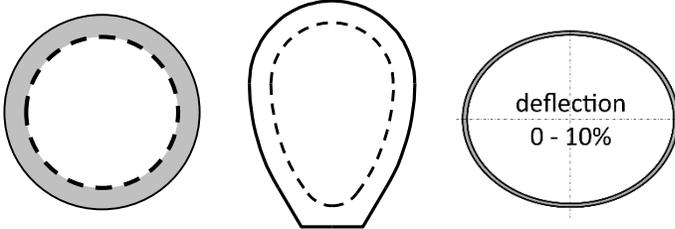
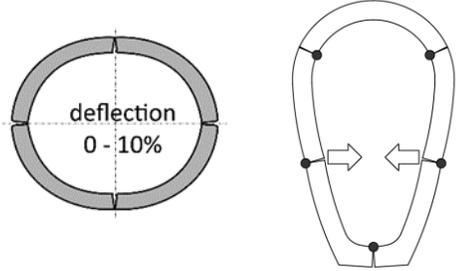
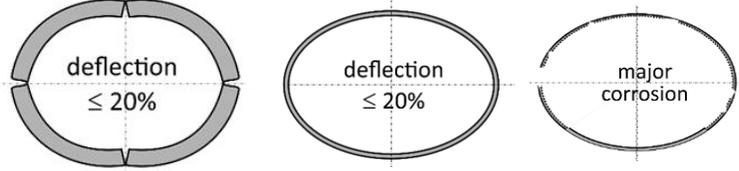
Les caractéristiques principales de la méthode

- Objectif
 - Calculer l'épaisseur minimale d'un liner pour des conditions données
 - Vérifier une épaisseur
- Domaine d'application du MOP 145:
 - Close-fit liners : CIPP et Tuyaux de gainage (Fold and Form).
 - Les tubages avec vide annulaire injecté ne sont pas concernés mais sont calculables.
- Méthode applicable aux liners non-circulaires
- Méthode de calcul « aux états limites »
 - Les actions (pression hydrostatique...) sont majorées et les résistances (à la flexion...) sont minorées par des facteurs qui tiennent compte de la variabilité (pas de facteur de sécurité global).
- On distingue 3 états d'accueils qui conditionnent les vérifications à réaliser.

Les principales hypothèses de la méthode

- Le liner est une structure mince et souple, indépendante de la conduite d'accueil, plaquée sur la paroi interne.
- Le dimensionnement est basé sur la forme réelle de la conduite d'accueil notamment les rayons de courbures pour les profils non circulaires et les imperfections géométriques.
- L'action principale est la pression hydrostatique externe.
- Le dimensionnement se fait à long terme pour tenir compte du fluage en condition humide, du vieillissement des matériaux et des déformations différées de la conduite d'accueil.

Les états d'accueil

	Etat I	Etat II Conduites rigides	Etat III
			
Désordres	<p>Non étanche Dégradations superficielles Ovalisation limitée à Min (10%, limite ELS) pour les conduites flexibles.</p>	<p>Fissures longitudinales Conduite circulaire avec 4 fissures clé/reins.radier et ovalisation < 10% Conduites non circulaires fissurées.</p>	<p>Dégradations profondes des matériaux Buses métalliques corrodées. Maçonnerie très dégradée. Ovalisation limitée à 20%</p>
Etat mécanique	Capable d'équilibrer l'ensemble des charges sans déformation (conduite rigide) ou avec déformation acceptable (conduite souple).	Capable d'équilibrer l'ensemble des charges <u>avec déformation limitée</u> .	Incapacité, à terme, d'équilibrer l'ensemble des charges.
Exigences de calcul	Résister à la pression de la nappe.	Résister à la pression de la nappe. Résister aux déformations différées de la conduite fissurée.	Résister à la pression de la nappe. Résister aux déformations différées. Résister aux pressions du sol actuellement appliquées sur la conduite.

Les états limites ultimes et de service

ELU = Mode de ruine de la structure

ELS = Performance limite en fonctionnement normal

			HOST PIPE STATES		
			Etat I	Etat II	Etat III
Etats limites ultimes	1	Flambement sous la pression hydro. externe	x	x	x
	2	Rupture du matériau sous la pression hydro. Externe (contrainte ou allongement pour les matériaux verre)	x	x	x
	3	Rupture du matériau sous deflection différée (contrainte ou allongement) * Dans l'état II, la rigidité du liner est négligée.		x *	x
	4	Flambement "multiondes" sous l'effet de la pression du sol et de la nappe (peu probable mais vérifié quand même)			x
Etats limites de service	0	Deflection du liner	x	x	x

Tous ces états limites doivent être vérifiés !

Les facteurs de sécurité

1. Facteurs de majoration des actions:

Action (Force, charge)	Symbol	ASCE	AASHTO
Pression hydrostatique externe	γ_{GW}	1.6	
Pressions dues au poids des terres	γ_{DL}	1.2	1.3 – 1.95
Pressions dues aux charges roulantes	γ_{LL}	1.6	1.75

2. Facteurs de minoration des résistances:

Résistances	Symbol	
Module de flexion à long-terme, E_{50}	Φ_{LM}	0.8
Résistance en flexion à long-terme, $\sigma_{50,F}$	Φ_{LF}	0.85 - 0.9 - 1 **
Résistance à la deformation en milieu acide, ε_L	$\Phi_{L\varepsilon}$	1.0
Module eodométrique du sol	Φ_S	0.8

** 0.85 ... CIPP imprégné sur site
 0.90 ... CIPP imprégné en usine
 1.00 ... fold-and-form

Principes du calcul aux états limites

La résistance minorée doit être supérieure à l'effet des actions majorées

$$\Phi \cdot R_n \geq E\{\gamma_i \cdot Q_{n,i}\}$$

$\Phi \leq 1$ est le facteur de minoration de la résistance
 R_n est la résistance nominale ou caractéristique
 Q_n est la valeur nominale de l'action
 $\gamma_i \geq 1$ est le facteur de majoration de l'action
 $E\{\}$ est l'effet des actions majorées.

On calcul pour chaque état limite le rapport entre la résistance minorée et l'effet des actions majorées

$$CDR_i = \frac{\Phi \cdot R_n}{\gamma \cdot Q_n} = \frac{\text{Résistance nominale minorée}}{\text{Effet des actions majorées}} \geq 1 \quad CDR_i \text{ Capacité sur Demande Ratio}$$

Tous les rapports (CDR_i) doivent être supérieurs à 1.0

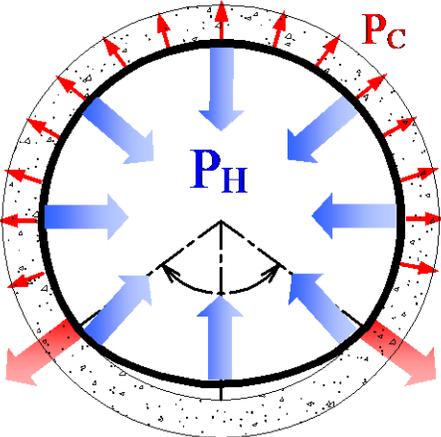
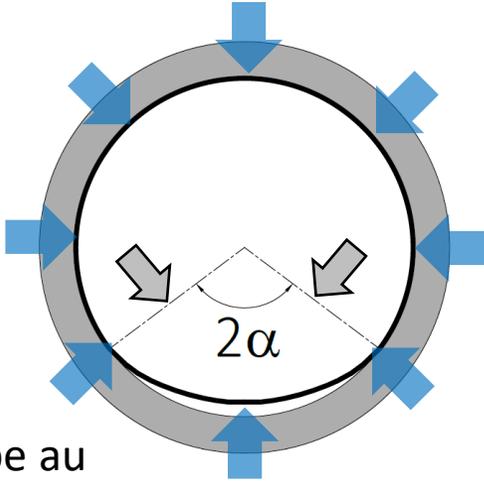
Le comportement des liners sous la pression hydrostatique externe

Développement du(es) lobe(s) de déformation
Comportement et calcul critique – sous-critique

Développement du(des) lobe(s) de déformation

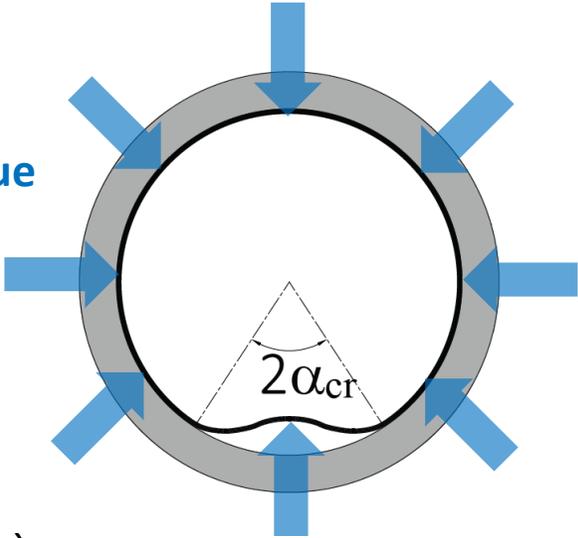
Circulaire

Formation d'un lobe au niveau du radier.



PH → Pcritique

L'extension angulaire du lobe diminue avec l'augmentation de la pression ce qui contribue à la résistance du liner.

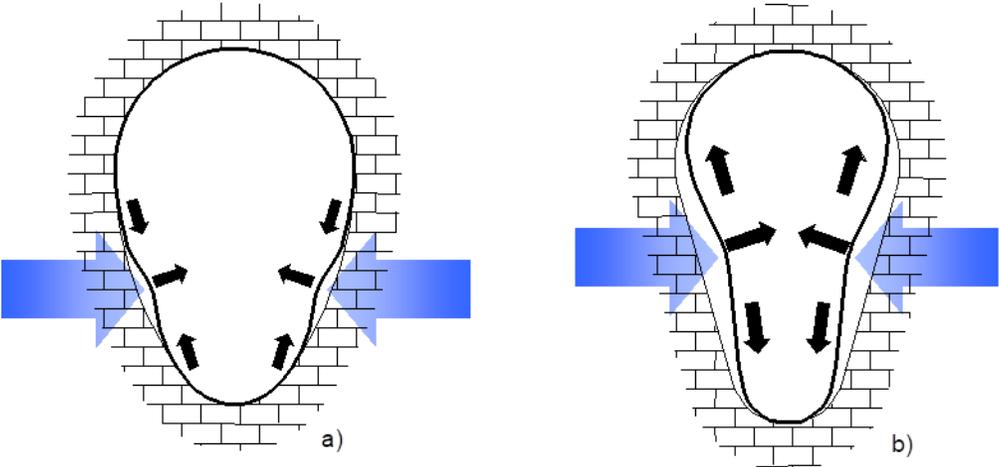


Flambement : annulation de la raideur en flexion et augmentation rapide de la flèche qui entraîne la rupture du liner.
La pression critique de flambement est 5 à 20 fois supérieure à celle du tube libre
 ⇒ effet de « coffrage ».

La pression de contact Pc entre le liner et la paroi est faible (< 5% pression hydrostatique) sauf aux 2 points de décollement.

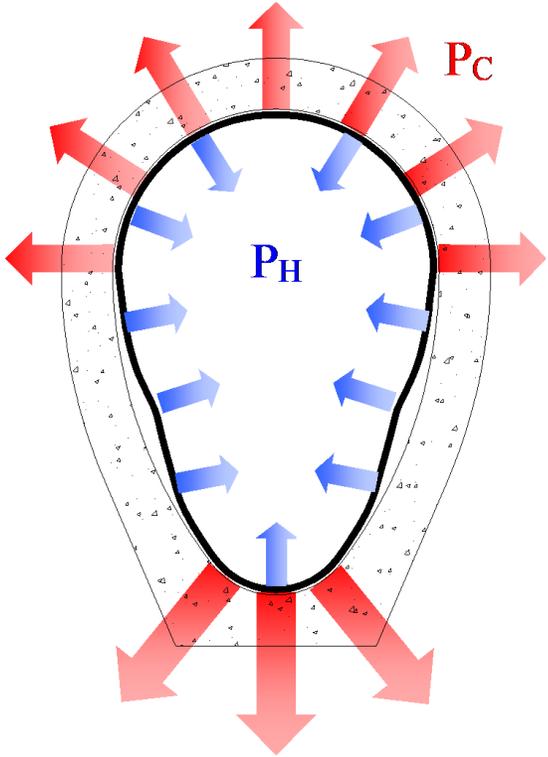
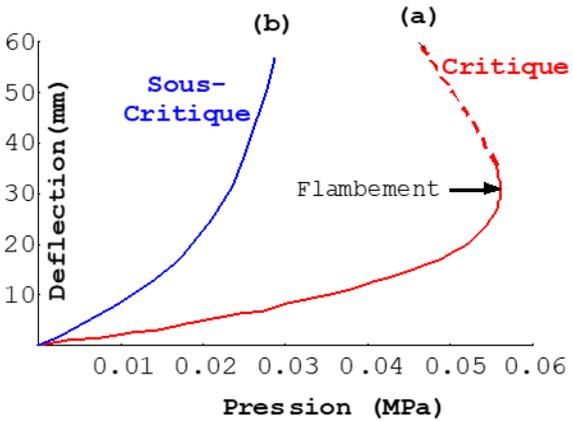
Développement du(des) lobe(s) de déformation

Non Circulaire



Comportement « critique »
Le lobe se localise puis flambe

Comportement « sous-critique »
Le lobe s'étend progressivement



La pression de contact entre le liner et la paroi est très élevée.

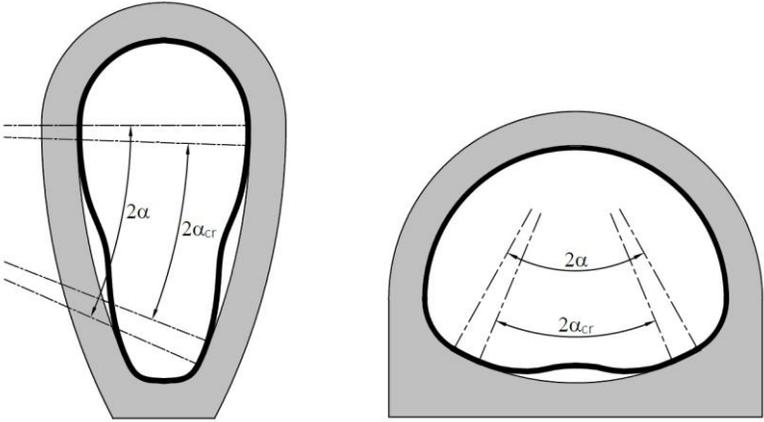
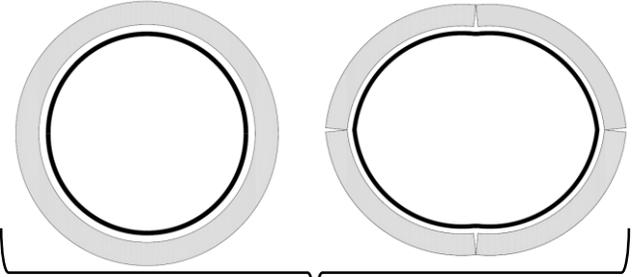
Approches de calcul « critique » et « sous-critique »

- 2 approches de calcul :
 - Approche « critique » pour les formes circulaires et les formes non-circulaires qui vérifient la condition sur l'angle critique de flambement du lobe.
 - Approche « sous-critique » pour les formes qui comportent des parties rectilignes et celles qui ne respectent pas la condition sur l'angle critique.
 - L'approche « critique » est basée sur la **pression critique de flambement** et donne également les sollicitations (contraintes) dans le liner. Elle est d'application simple et directe.
 - L'approche « sous-critique » est basée sur la **déflexion maximale** et nécessite un calcul itératif. Elle est plus complexe à mettre en œuvre.

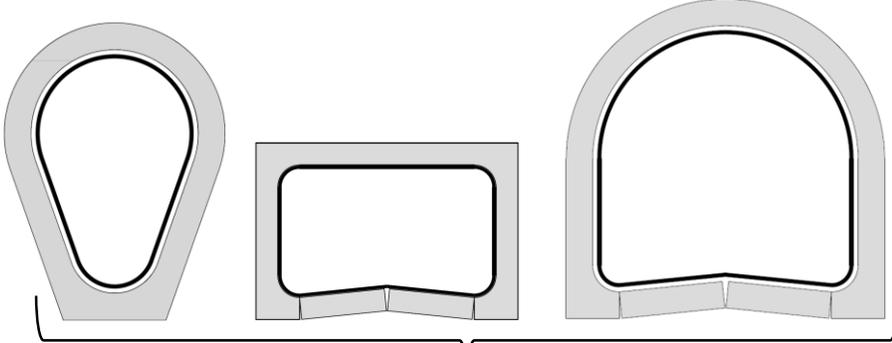
Approches de calcul « critique » et « sous-critique »

Profils NC formés d'arcs de cercle

Profils circulaires/elliptiques



Profils NC avec parties droites



Calcul de l'angle critique de flambement du lobe

Oui $\frac{\alpha_{cr}}{\alpha} \leq 1,0$ Non

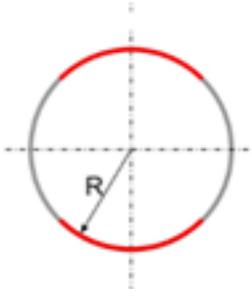
Calcul « critique »

Le calcul critique reste toutefois acceptable tant que $\alpha_{cr} \leq 1.3 \alpha$

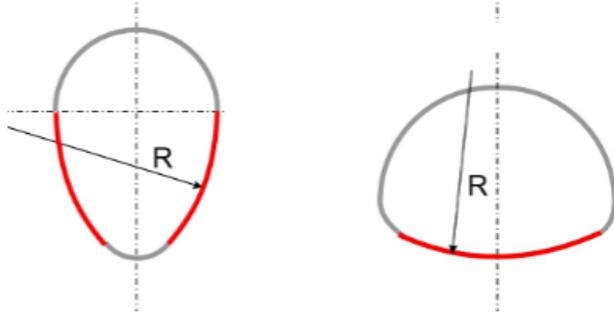
Calcul « sous-critique »

Profils « critique » ou « sous-critique »

Critique

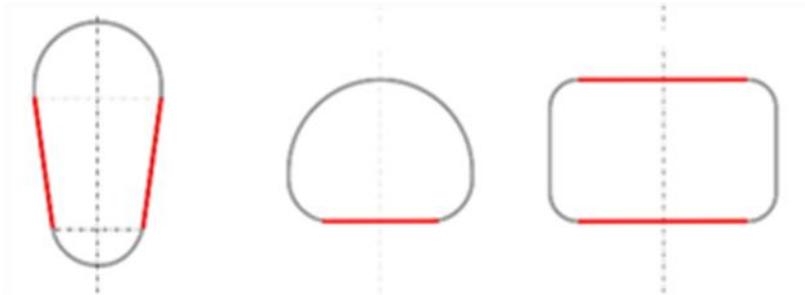


Critique ou sous-critique selon la condition sur l'angle critique de flambement



Profils critiques : ces profils sont peu déformables et ont une résistance élevée à la pression extérieure limitée par la pression critique de flambement ou la rupture du matériau. **Ils sont très sensibles aux imperfections de forme de la conduite d'accueil (pour les chemisages).**

Sous-critique



Profils sous-critiques : ces profils sont très déformables mais ne présentent pas d'instabilité de flambement. **Ils sont peu sensibles aux imperfections de forme de la conduite d'accueil.**

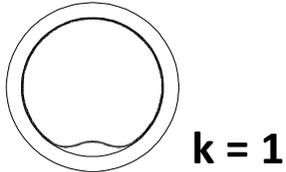
Le calcul « critique »

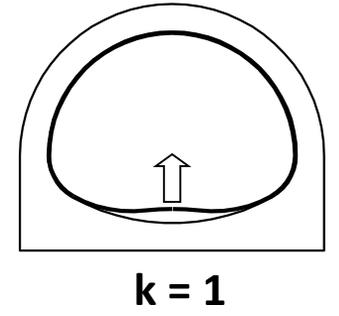
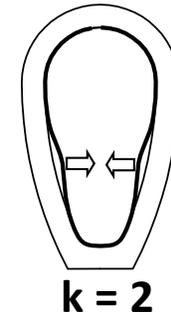
• Pression critique de flambement

Thépot (2000)
$$p_{cr} = 2.02 \cdot k^{0.4} \cdot \kappa_p \cdot \frac{(EI_L)^{0.6} \cdot (EA_L)^{0.4}}{P^{0.4} \cdot R^{1.8}}$$
 Cas général

$$p_{cr} = 0.455 \cdot k^{0.4} \cdot \kappa_p \cdot \frac{E_L}{1 - \nu^2} \cdot \frac{e^{2.2}}{P^{0.4} \cdot R^{1.8}}$$
 Paroi pleine et homogène

↓ $P=2\pi R$ et $k = 1$

$$p_{cr} = 0.218 \cdot \kappa_p \cdot \frac{E_L}{1 - \nu^2} \cdot \left(\frac{e}{R}\right)^{2.2}$$
 Cas circulaire 



EI_L Rigidité de flexion à long terme de la paroi

EA_L Rigidité axiale à long terme de la paroi

E_L Module de flexion à long terme de la paroi

κ_p Coefficient de réduction du aux imperfections géométrique

Approche de calcul « critique »

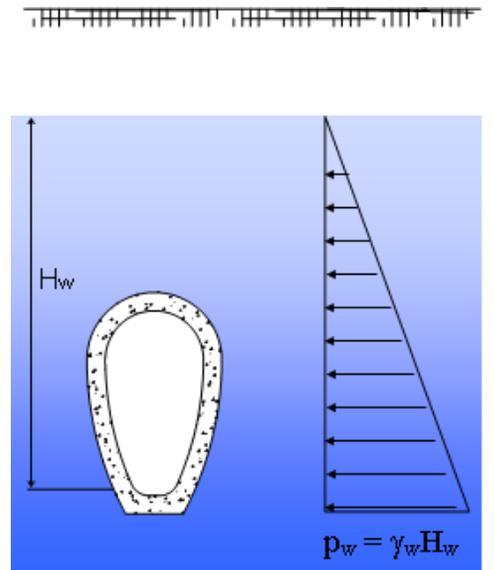
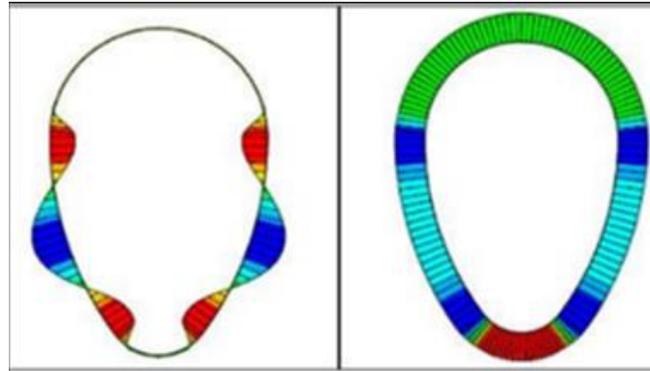
- Calcul des sollicitations maximales dans la paroi

Le moment de flexion est maximal au centre du lobe:

$$M_{w,u} = \left[1 - \left(1 - \frac{p_{w,u}}{p_{cr,w,d}} \right)^{0.5} \right] \cdot M_{cr,w,d}$$

L'effort normal est constant :

$$N_{w,u} = (p_{w,u}/p_{cr,w,d}) \cdot N_{cr,w,d}$$



Méthode de calcul « critique »

- Vérification des états limites

ELU1 – Ruine par flambement :

$$CDR_1 = \frac{P_{cr,w,d}}{P_{w,u}} \geq 1$$

ELU2 – Rupture de la paroi par dépassement de la contrainte admissible

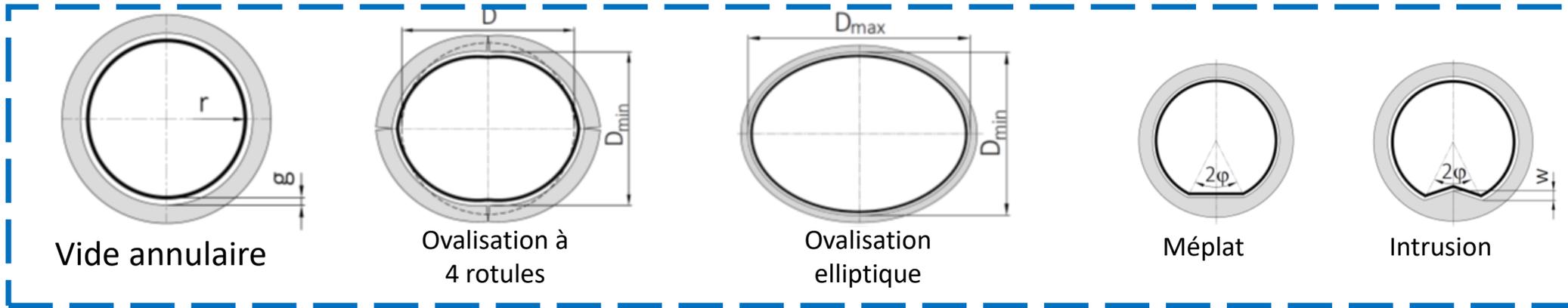
$$CDR_2 = \frac{\sigma_{F,50,d}}{\sigma_{w,c,u}} \geq 1$$

ELU3 – Rupture de la paroi par dépassement de l'allongement admissible en milieu acide (**produits verre**)

$$CDR_3 = \frac{\varepsilon_{L,d}}{\varepsilon_{w,u}} \geq 1$$

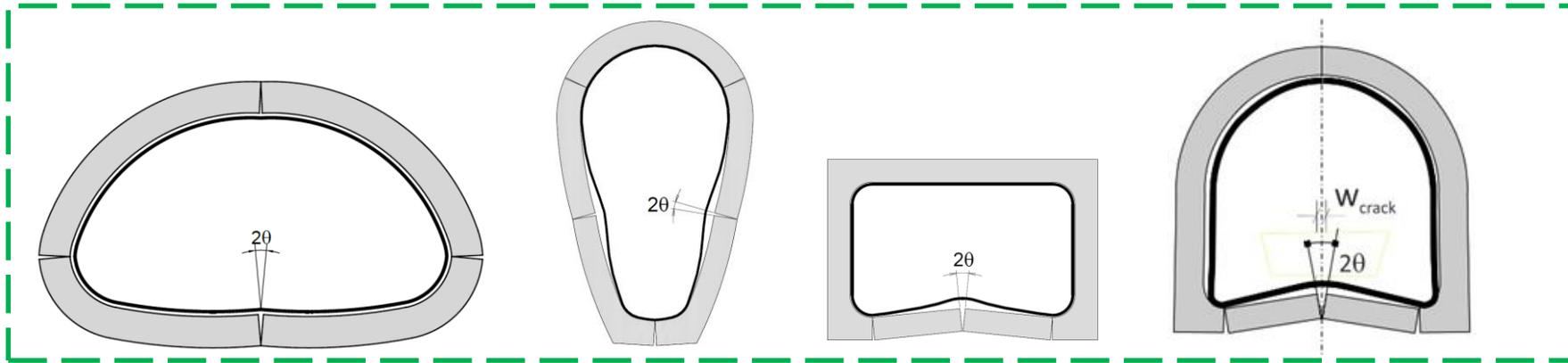
Les imperfections géométriques

- Les imperfections géométriques diminuent la pression critique de flambement et augmentent les sollicitations (M,N)



3R2014

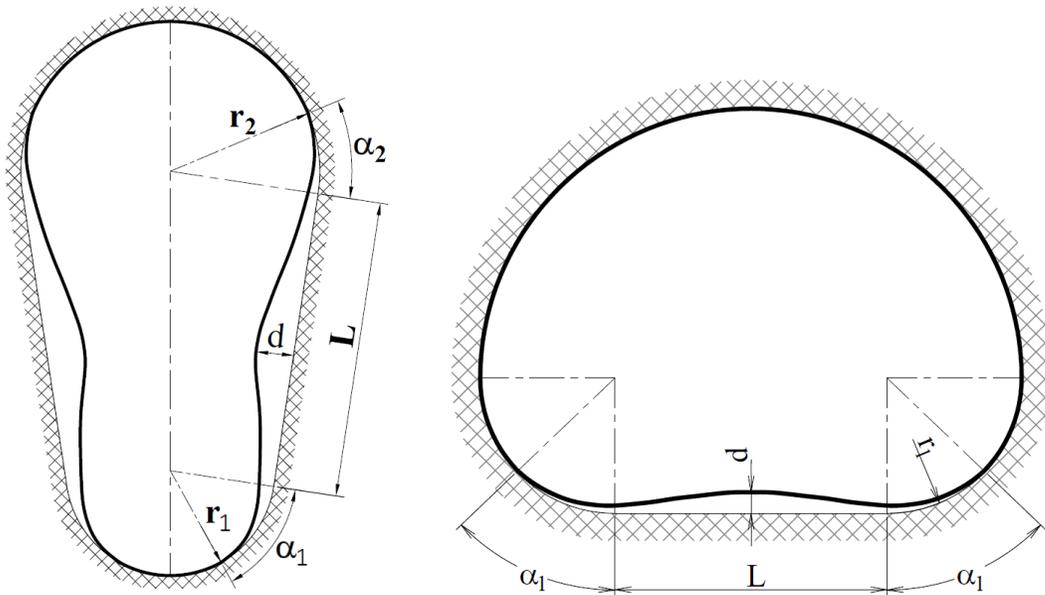
Fissures (rotules)
Ajout des profils
non circulaires



MOP 145

Approche de calcul « sous-critique »

- Profils avec parties rectilignes (3R2014 et MOP 145)



$$L \geq \text{MAX}(r_1, r_2)$$

Calcul ELS
Vérification de la flèche admissible

```

    graph TD
      A[Flèche admissible d (ELS)  
d ≈ 3% L] --> B[Calcul des angles de décollement α1 et α2]
      B --> C[Calcul de la pression admissible p3%]
      C --> D[On vérifie : p_w ≤ p3%]
    
```

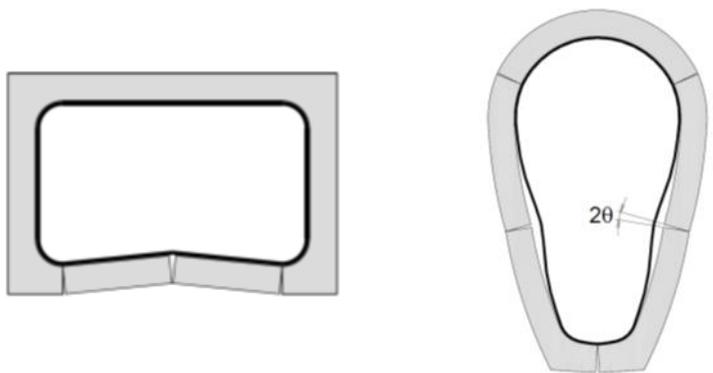
Calcul ELU

```

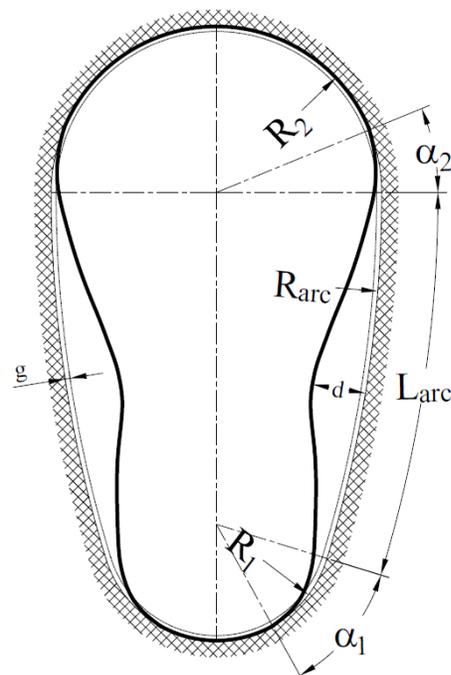
    graph TD
      A[Pression ultime (majorée)  
Pw,u] --> B[Flèche ultime (majorée)]
      B --> C[Moment de flexion ultime  
M_w,u  
Effort Normal ultime N_w,u]
      C --> D[On vérifie :  
Rupture de la paroi  
CDR2 et CDR3]
    
```

Les améliorations apportées par le MOP 145 à la méthode de l'ASTEE

- Le MOP 145 étend les profils calculables
 - Profils à trois rayons de courbure qui ne vérifient pas la condition sur l'angle critique
 - Profils avec partie rectiligne courte.
- Le MOP 145 ajoute la prise en compte des fissures.

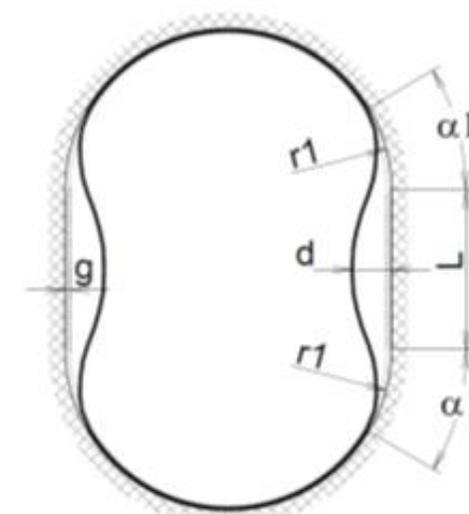


Profils à 3 rayons de courbure



$$L_{\text{arc}} \geq \text{MAX}(r_1, r_2)$$

Profils symétriques avec partie rectiligne courte



$$L \leq r_1$$

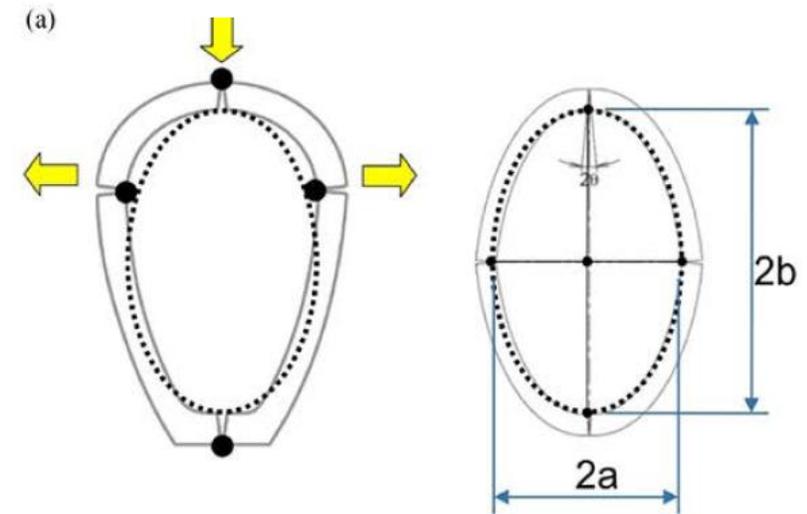
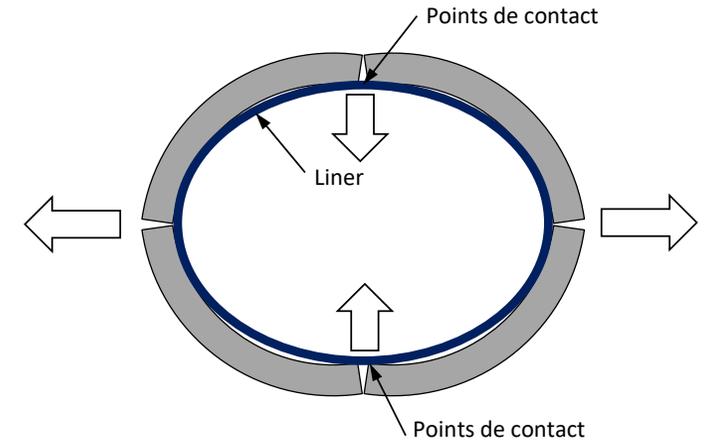
Le comportement des liners sous les autres actions

Déformations différées de la conduite d'accueil

Pressions appliquées ou transmises par le sol (état d'accueil III)

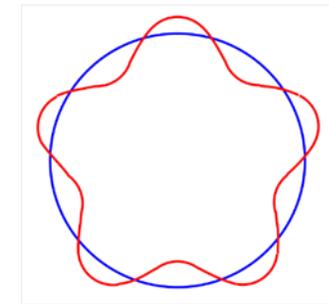
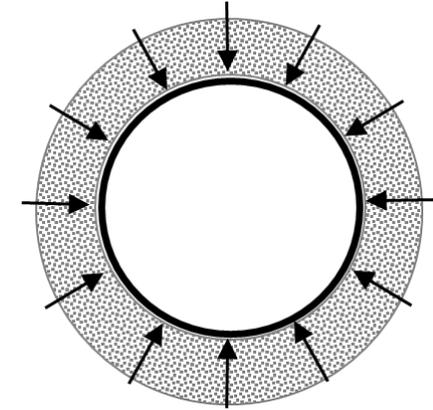
Les déformations différées de la conduite d'accueil

- **Etat d'accueil II** (conduites rigides fissurées)
- Une conduite rigide fissurée se comporte comme une conduite souple en interaction avec le sol
- La rigidité du liner est négligeable par rapport à la rigidité du complexe conduite fissurée/sol encaissant
- On suppose que la conduite fissurée peut s'ovaliser après la pose du liner. Ovalisation minimale: 2% pour les sols intacts et 5% pour les sols altérés (présence de vides).
- L'ovalisation différée crée des forces concentrées au niveau des points de contact (en clé et radier dans le cas circulaire).
- L'ovalisation différée s'ajoute à l'ovalisation initiale et diminue la résistance à la pression hydrostatique externe.
- Approche de calcul basée sur les travaux de M. Law et I.D. Moore (2007) pour le cas circulaire.
- **MOP 145** \Rightarrow **extension au cas non-circulaire, approche de R. Cichocki et I. D. Moore (2019).**

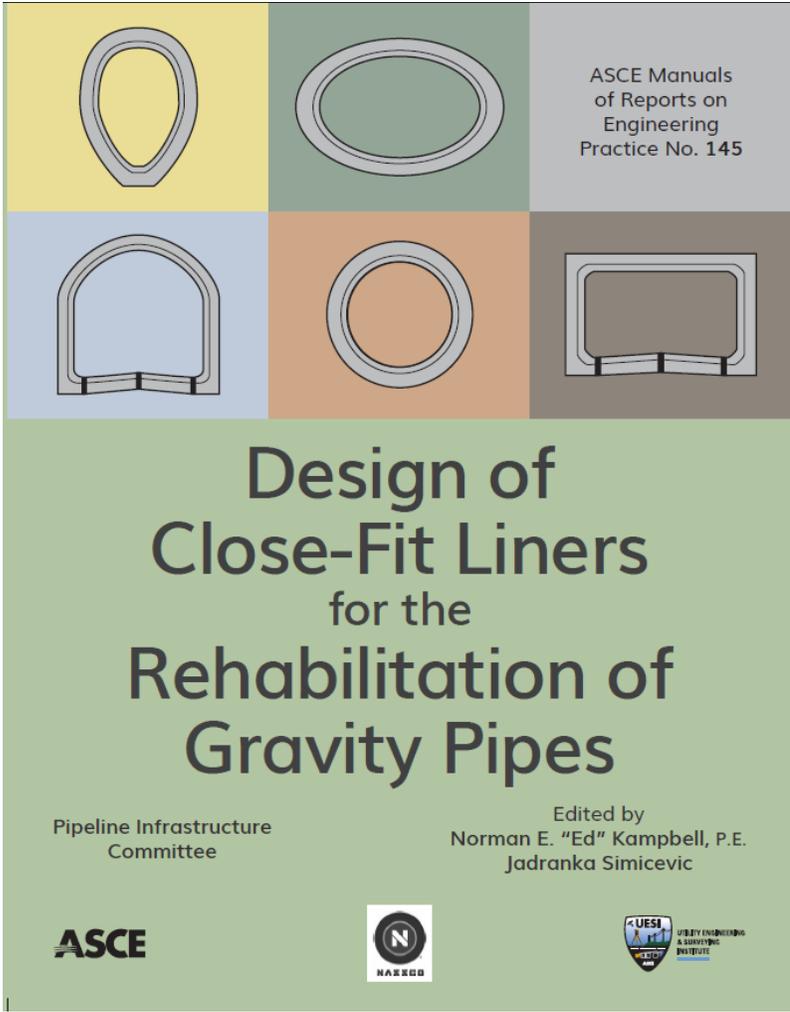


Pressions appliquées ou transmises par le sol

- **Etat d'accueil III** (dégradations profondes des matériaux ou ovalisation $> 10\%$)
- La rigidité du tuyau d'accueil est annulée, il retransmet tout ou partie des efforts au liner.
- Cas très peu probable mais on le vérifie quand même.
- On vérifie la résistance au flambement « multi ondes » du liner sous l'effet des charges transmises par le sol.
- Le calcul de la force circonférentielle critique est basée sur les travaux de I.D. Moore (1987,1989).
- **MOP 145 \Rightarrow Extension aux liners non-circulaire.**



Publication de la méthode et logiciel de calcul



Jadranka Simicevic, JPS Consulting
 jpsimicevic@gmail.com