

# **Dimensionnement mécanique des systèmes de rehabilitation Comparaison de différentes méthodes internationales ASTM F1216, WRc-SRM, DWA-A 143-2 et 3R-2014**

**Jean-Marie Joussin/FSTT**

**Avec le concours de Jean-Michel Bergue/FSTT-ASTEE, Dominique Orditz/CSTB  
et Olivier Thepot/Eau de Paris**

## Historique

- Le tubage (sliplining PE, coques PRV,...) & CIPP existent sur le marché de l'assainissement depuis plus de 25 ans et ont connu d'importants développements techniques

## Aujourd'hui coexistent 4 principales méthodes

- ATV M 127-2 devenue DWA A 143-2 (G 2012/ publiée finalement en 2015), WRc-SRM (UK - première publication en 1984, la dernière en 2001), ASTM F 1216 (US - 2009) et 3R2014 (F 2014)

## La nouvelle méthode 3R2014 a été développée...

- Pour prendre en compte l'ouvrage d'accueil existant (juste design, pas d'overdesign)
- Pour prendre en compte les plus récentes publications (Prof Falter/ATV, Prof Moore/Kingston University, Dr Thepot/RERAU...)
- Pour intégrer les récentes normes Européennes et internationales (relining, CIPP, Eurocodes...)
- Pour être applicable à la plupart des formes d'ouvrages (circulaire, ovoïde, en arche, oval, rectangulaire...)
- Pour proposer un software facile à utiliser

**Nous allons passer en revue les 4 différentes méthodes en examinant en particulier les aspects suivants:**

- **Domaine d'application**
- **Caractérisation de l'ouvrage d'accueil**
- **Prise en compte de la nappe phréatique pour les conduits circulaires et non circulaires (si applicables) avec plus de détails sur l'approche française (la plus récente) et celle du WRC (la plus utilisée!)**
- **Prise en compte des autres charges (remblai & trafic)**
- **Coefficients de sécurité globaux et partiels**

# Domaines d'application

		<b>DWA A 143-2</b>	<b>WRc - SRM</b>	<b>ASTEE 3R2014</b>	<b>ASTM F1216</b>
<b>Techniques couvertes</b>		CIPP, tubes PRV et coques, tubes longs (PE),... (gravitaire)	CIPP, tubes PRV et coques, tubes longs (PE),... (gravitaire)	CIPP, tubes PRV et coques, tubes longs (PE),... (gravitaire)	CIPP (gravitaire, pression)
<b>F o r m e s</b>	<b>Circulaire</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
	<b>Ovoïde 3x2</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X***</b>	
	<b>Ovoïde 2x1</b>	<b>*</b>	<b>**</b>	<b>X ***</b>	
	<b>Autres formes d'ovoïdes</b>	<b>*</b>	<b>**</b>	<b>X ***</b>	
	<b>En fer à cheval, arche</b>	<b>*</b>	<b>**</b>	<b>X ***</b>	
	<b>Elliptique</b>	<b>*</b>	<b>**</b>	<b>X ***</b>	
	<b>Rectangulaire</b>	<b>*</b>	<b>**</b>	<b>X ***</b>	

\* FEM recommandé

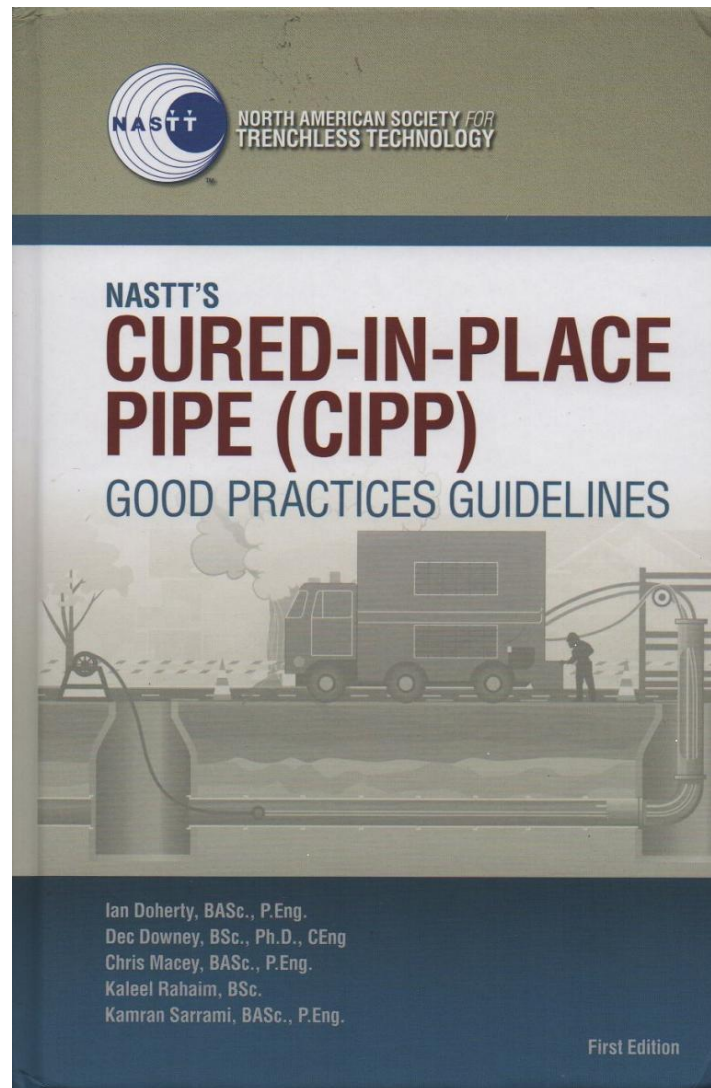
\*\* avec restrictions

pour calcul à la  
nappe

\*\*\* calcul à la nappe couvert

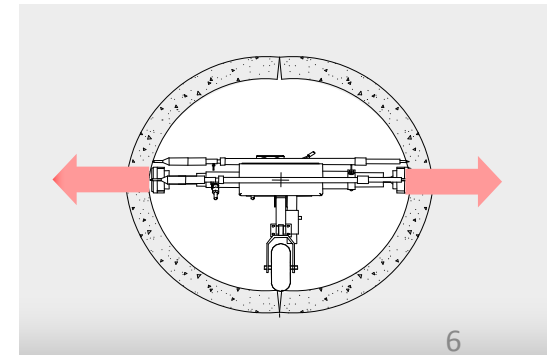
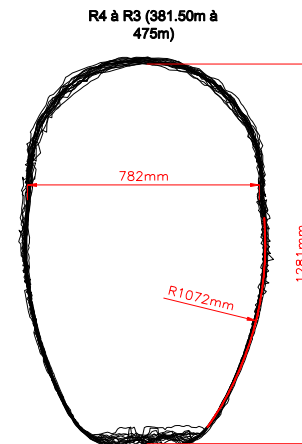
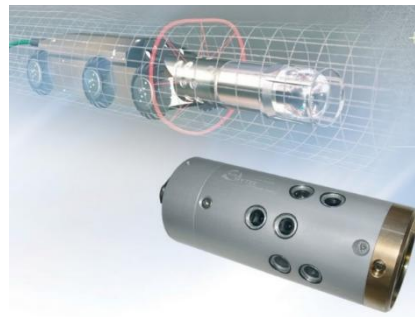
autres charges si circulaire (sinon FEM)

La récente publication « **NASTT's CIPP good practices guidelines** » annonce des développements notamment de la F 1216 pour le dimensionnement des tubes non circulaires et cite les méthodes européennes 3R2014 et DWA pour les ouvrages non circulaires.



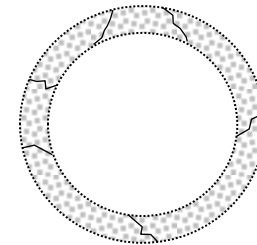
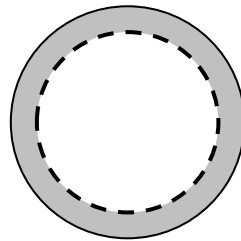
# Caractérisation de l'ouvrage d'accueil

- **L'état de l'ouvrage existant constitue la donnée de base du design:**
  - **Etanchéité**
  - **Matériau:** nature (carottage,...), altérations (CCTV, visuel,...)
  - **Fissuration:** nombre, type, position (CCTV, visuel,...)
  - **Geométrie :** profilage (par laser par ex) recommandé
- **La rigidité du sol environnant peut jouer un rôle majeur mais est souvent oubliée:** un essai MAC peut aider!



# Caractérisation de l'ouvrage d'accueil

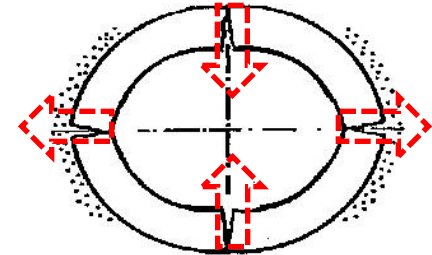
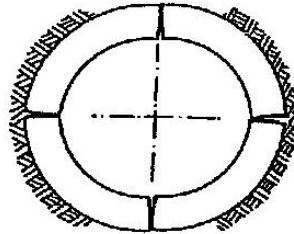
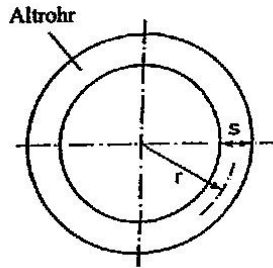
- ASTM F1216: 2 états considérés



	<b>“Partially deteriorated”</b>	<b>“Fully deteriorated”</b>
<b>Désordres</b>	Etanchéité compromise, corrosion limitée...	Plus aucune résistance mécanique à terme
<b>Evolution dans le futur</b>	Stable	Susceptible de se rompre (buckling, casse)
<b>Critères de design</b>	Nappe	Caractéristiques du sol - Liner résiste à la nappe et autres charges (sol, traffic)

# Caractérisation de l'ouvrage d'accueil

- DWA-A 143-2: 3 états considérés

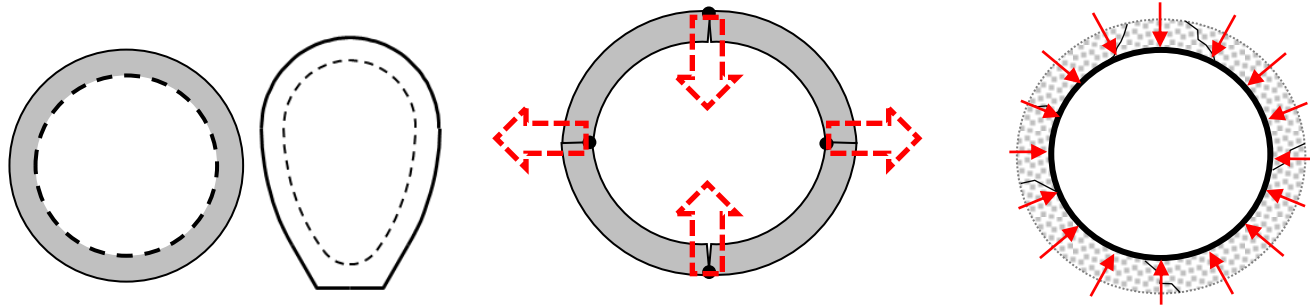


	<b>Etat I</b>	<b>Etat II</b>	<b>Etat III</b>
<b>Désordres</b>	Sain structurellement	Fissuré déformations <3%	Très fissuré déformations <10%
<b>Evolution dans le futur</b>	Stable	Stable - évolution déformations peu improbables	Stable à court terme mais avec évolution très défavorable attendue
<b>Critères de design</b>	Nappe		Caractéristiques du sol - Resiste à la nappe et autres charges



# Caractérisation de l'ouvrage d'accueil

- ASTEE 3R2014: 3 états considérés



	<b>Etat I</b>	<b>Etat II</b>	<b>Etat III</b>
<b>Désordres</b>	Etanchéité compromise, corrosion superficielle...	Fissuré Déformations < 10%	L'ouvrage a perdu sa résistance structurelle (fissures importantes, cassures,...)
<b>Evolution dans le futur</b>	Stable	Stable mais probable évolution défavorable (déformations par ex)	Stabilité plus assurée à court terme
<b>Critères de design</b>	Nappe	Nappe et déformations limitées ultérieures	Caractéristiques du sol - résiste à la nappe et autres charges <sup>9</sup>

# Caractérisation de l'ouvrage d'accueil selon le WRc

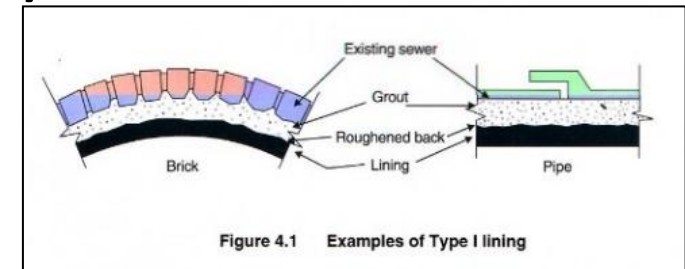
- **Pas de réelle évaluation du sol et de la structure existante**

- L'ouvrage d'accueil est stable mécaniquement au moment des travaux de rehabilitation, sa déformation doit être inférieure à 10% et le sol environnant offrir un support suffisant (sinon traitement du sol par injection)

- **2 options de design sont proposées:**

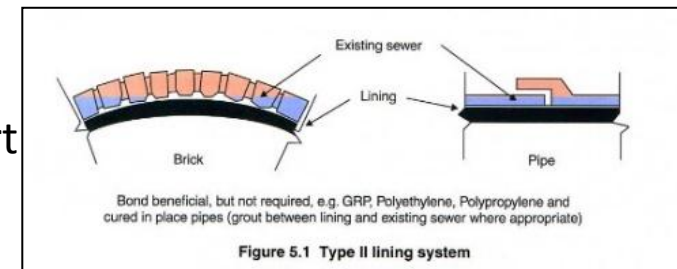
- **WRC SRM type I design (coque + coulis)**

- Ouvrages fissurés, partiellement dégradé...
    - Prise en compte uniquement trafic et remblai
    - Liner + coulis + ouvrage existant agissent de façon composite (minimum d'adhérence liner coulis requise)



- **WRc SRM type II design (CIPP, liner avec ou sans coulis)**

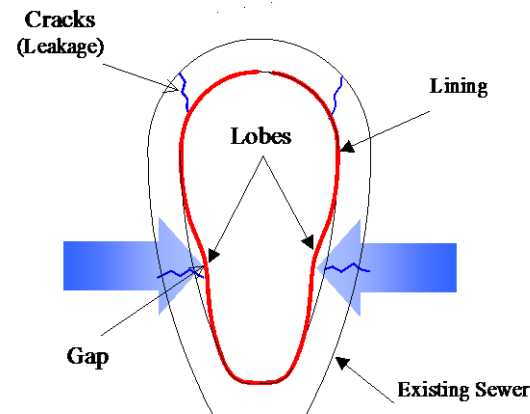
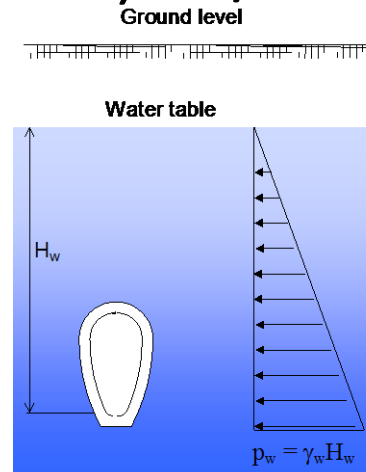
- Le liner est dimensionné uniquement vis à vis de la nappe (pas d'adhérence liner coulis requise)
    - L'ouvrage existant non étanche assure un bon support au liner qui préserve la stabilité à long-terme

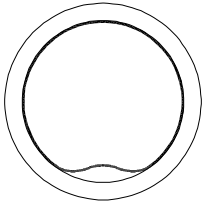


# Design vis-à-vis de la nappe

## Liniers circulaires – Liniers non circulaires

- En général c'est l'aspect le plus critique et donc dimensionnant!
- En l'absence d'information une hauteur minimale  $H_w$  peut être considérée (pour ouvrages peu profonds - 3R2014: min hauteur liner + 0,5 m or 1,5 m sur FE)
- Etats limites considérés: flambement + rupture matériau (ELU) et/ou déformation (ELS)



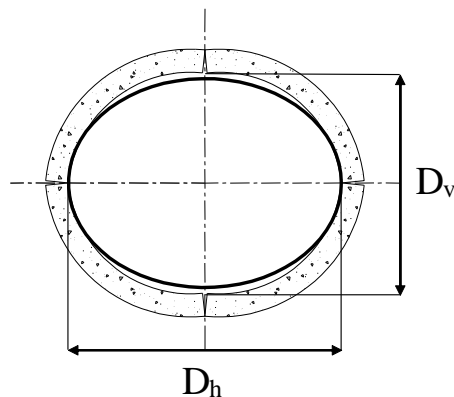


# Design vis-à-vis de la nappe

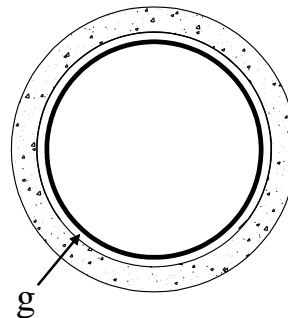
## Liners circulaires – Liners non circulaires

- **Formes et imperfections géométriques**
  - La géométrie du tube d'accueil a une grande importance pour la résistance à la nappe du liner (surtout en non circulaire).
  - Les imperfections ont aussi une incidence forte sur la capacité du liner (concerne les CIPP seulement - pas considéré pour coques)

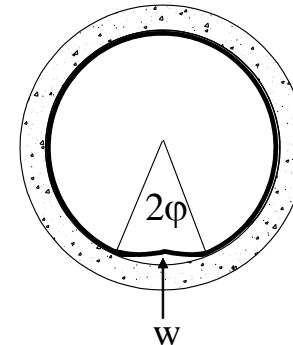
Ovalisation (4 fissures)

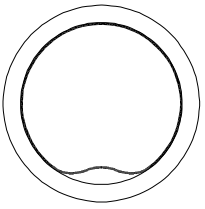


Vide annulaire



Intrusion locale





# Design vis-à-vis de la nappe

## Cas du circulaire - Flambement général

- ASTM F1216/WRc SRM

$$p = \frac{2K \cdot E_L}{(1 - \nu^2)} \frac{1}{(SDR - 1)^3} \frac{C}{N}$$

- Basé sur la formule de Timoshenko modifiée par un facteur dit d'encoffrage K of 7 (valeur évaluée expérimentalement)
- Coefficient de sécurité global N de 2.0
- Facteur de réduction pour l'ovalisation C
- Les autres imperfections ne sont pas considérées (telles que vide annulaire résiduel, intrusions...)
- Usage du « long term modulus »  $E_L$  pour tenir compte du vieillissement/fluage du matériau

# Design vis-à-vis de la nappe

## Cas du circulaire - Flambement général

- DWA-A 143-2

- Basée sur la formule de Glock's (solution analytique - 1977)

$$k_{rit} p_{a,d} = \kappa_{v,s} \cdot 2,62 \cdot \left( \frac{r_L}{t_L} \right)^{0,8} \cdot S_{L,d}$$

$r_L$ : rayon moyen

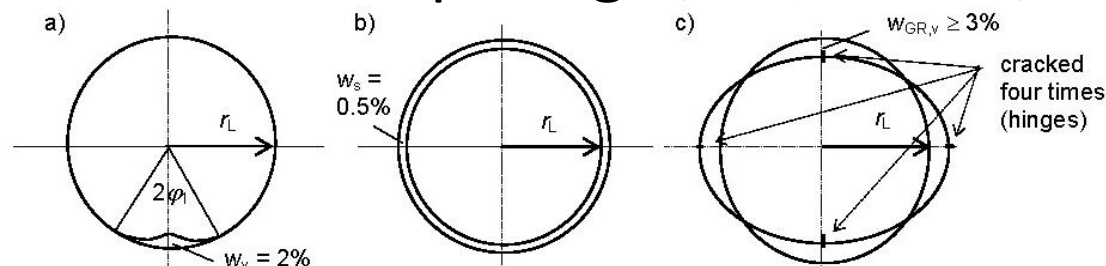
$t_L$ : épaisseur liner

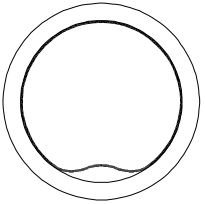
$S_{L,d}$ : rigidité annulaire à LT

$\kappa_{v,s}$ : facteur de réduction pour imperfections

- Pas de facteur d'encoffrage.

- Facteurs de réduction pour **3 types d'imperfections** (vide annulaire résiduel, intrusion, ovalisation) avec des valeurs minimum pour  $g$  **0,5%**, et  $w$  **2,0%**





# Design vis-à-vis de la nappe

## Cas du circulaire - Flambement général

- ASTEE 3R2014

- Basé sur une approche purement analytique

Pour un tube homogène et de paroi pleine:

$$p_{cr,we} = 0,218 \cdot \kappa_p \cdot \frac{E_{50,k}}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{2,2}$$

- On retrouve la formule de Glock

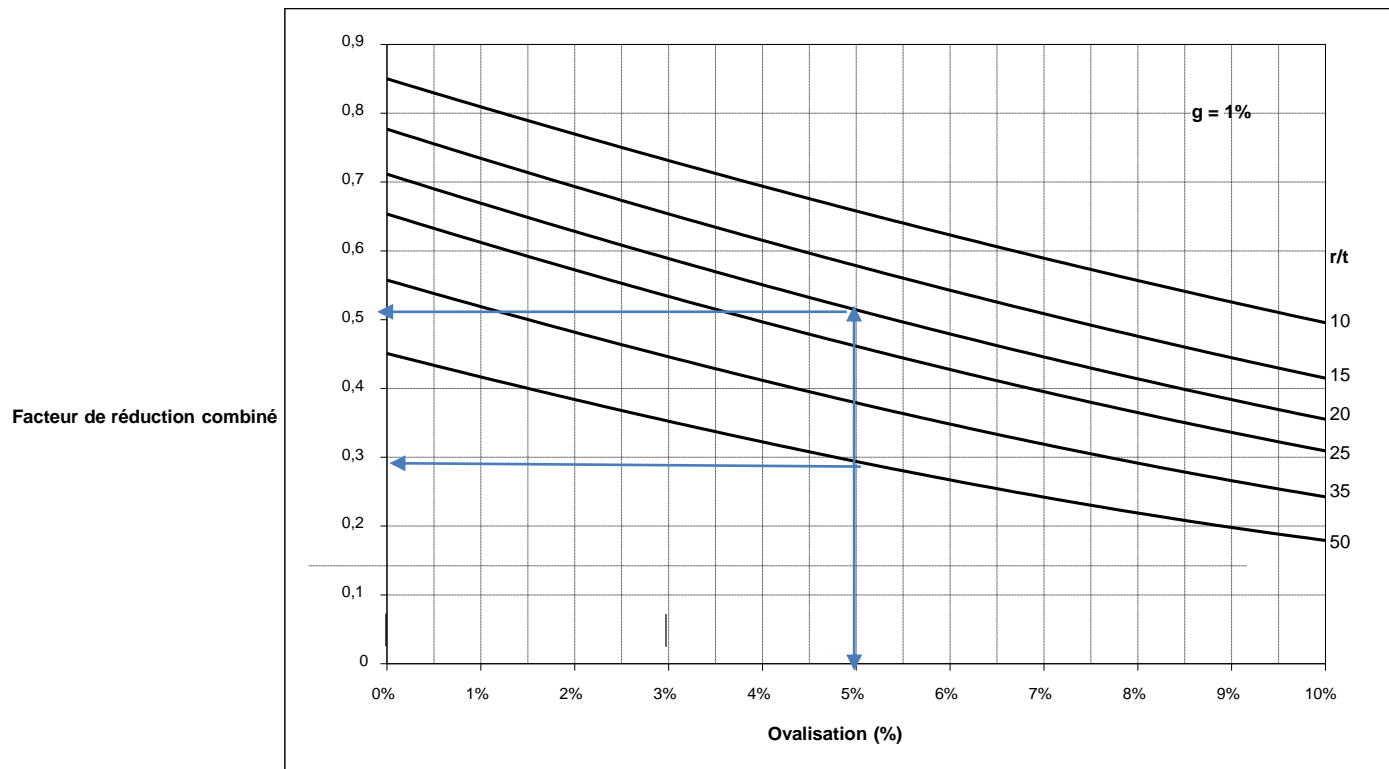
- Pas besoin d'introduire un facteur d'encoffrage

- Facteurs de réductions  $\kappa_p$  calculé pour g, intrusion et défaut d'ovalisation avec un minimum pour g de **1%**.

- Mode de flambement mono-lobe ( $k = 1$ )

# Design vis-à-vis de la nappe

## Illustration pour un CIPP circulaire - influence des imperfections

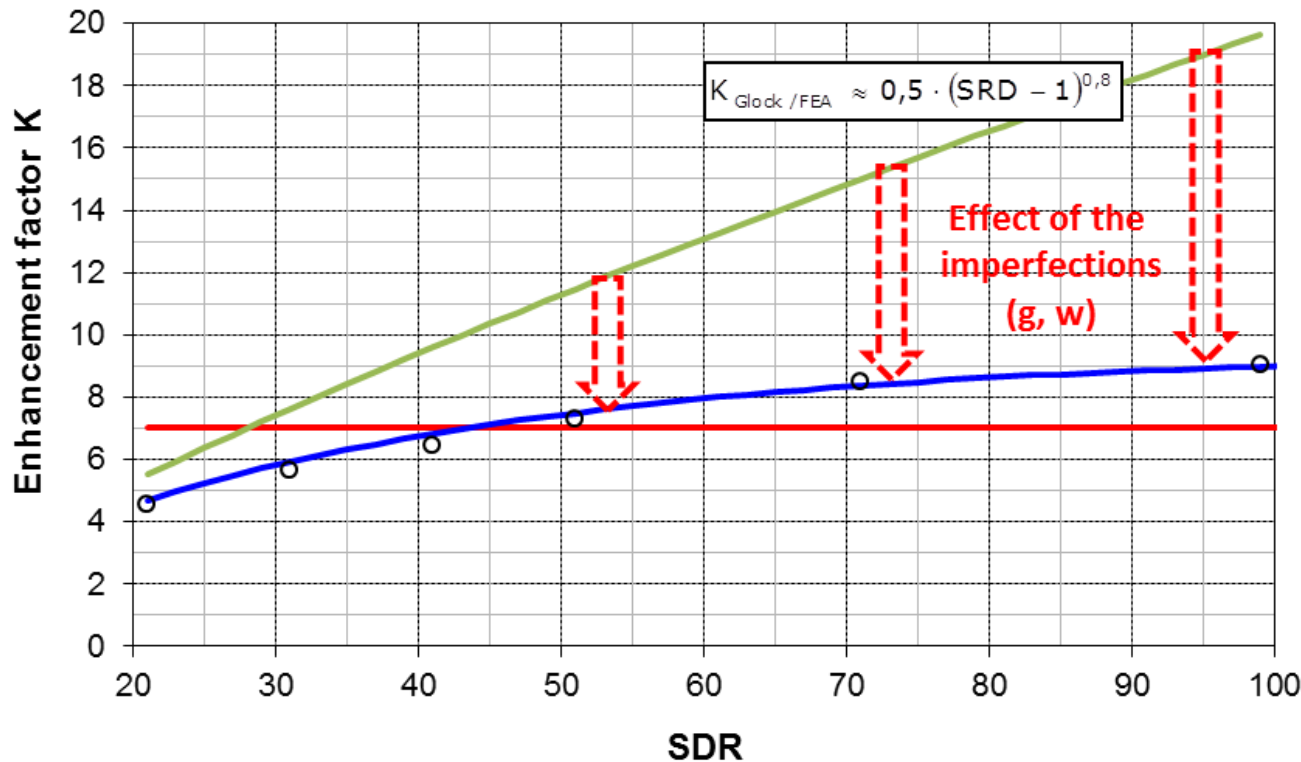




# Design vis-à-vis de la nappe

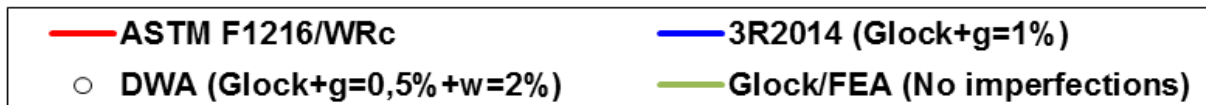
## Cas du circulaire - Flambement général

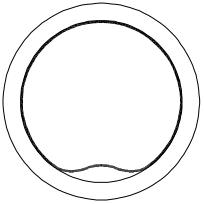
Enhancement factor K - Comparison between  
ASTM F1216/WRc – DWA-A 143-2 3R2014



Les 4 méthodes  
conduisent à  
des résultats  
cohérents!

(grâce à un choix  
approprié des  
niveaux  
d'imperfections...)

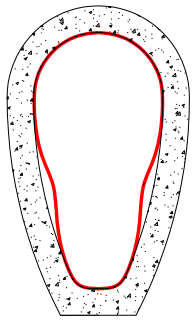




## Design vis-à-vis de la nappe

### Liners circulaires: calcul des contraintes

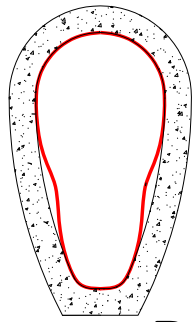
- WRc SRM: pas pris en considération
- ASTM F1216: flambement d'un anneau elliptique sous charge uniforme
- DWA-A 143-2: valeurs évaluées par lecture sur abaques basées essentiellement sur des calculs FEM (avec prise en compte des imperfections)
- ASTEE 3R2014: formules analytiques (avec prise en compte des imperfections)



# Design vis-à-vis de la nappe

## Cas du non circulaire

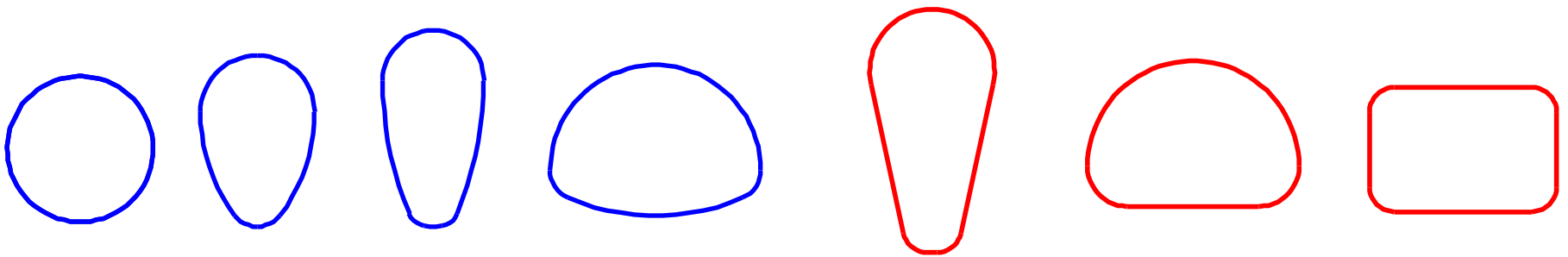
- ASTM F1216: pas couvert
- DWA-A 143-2: uniquement applicable aux ovoïdes 3x2 (calculés comme un liner circulaire avec rayon équivalent). Recommande la méthode FEM pour les autres formes.
- WRc SRM type II: méthode simplifiée pour les ovoïdes et ovales
- ASTEE 3R2014: méthode analytique .



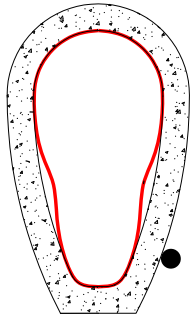
# Design vis-à-vis de la nappe

## Cas du non circulaire

- Résumé de la méthode ASTEE 3R2014
  - Applicables aux formes convexes
  - Profils classés en 2 catégories:
    - **Critique** (circulaire, ovoïde, arche,...)
    - **Sous-critiques** (oval avec flancs droits, rectangulaire...)

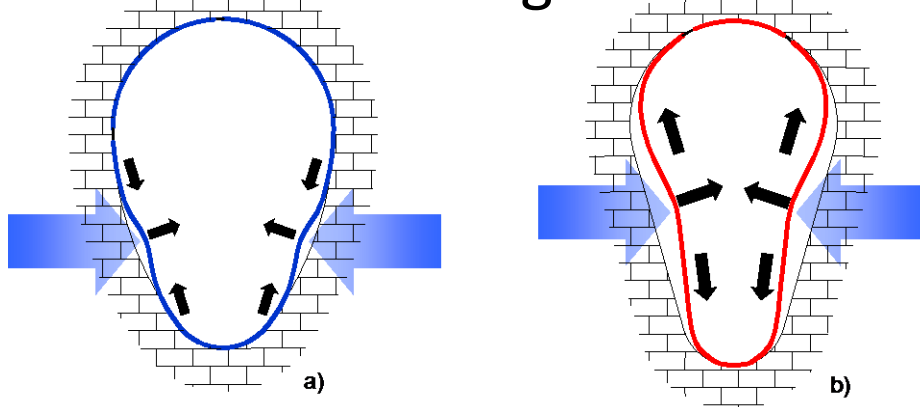


# Design vis-à-vis de la nappe



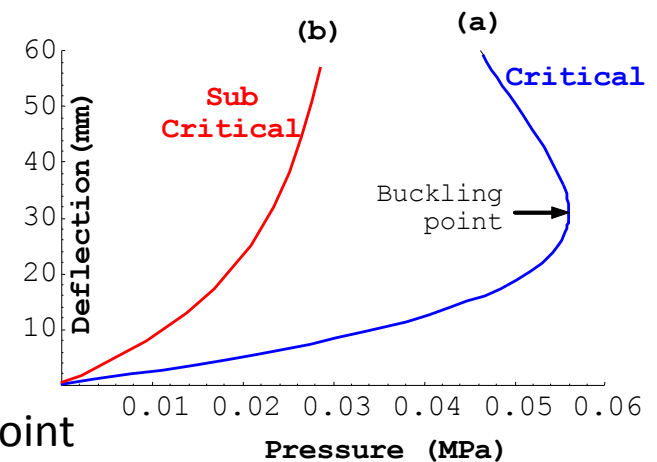
## Cas du non circulaire

- Les 2 types de liner se distinguent par leurs formes et leur comportement mécanique
  - Les liners critiques peuvent flamber sous l'effet de la pression extérieure
  - Les liners sous-critiques ne flambent pas mais subissent de grandes déformations



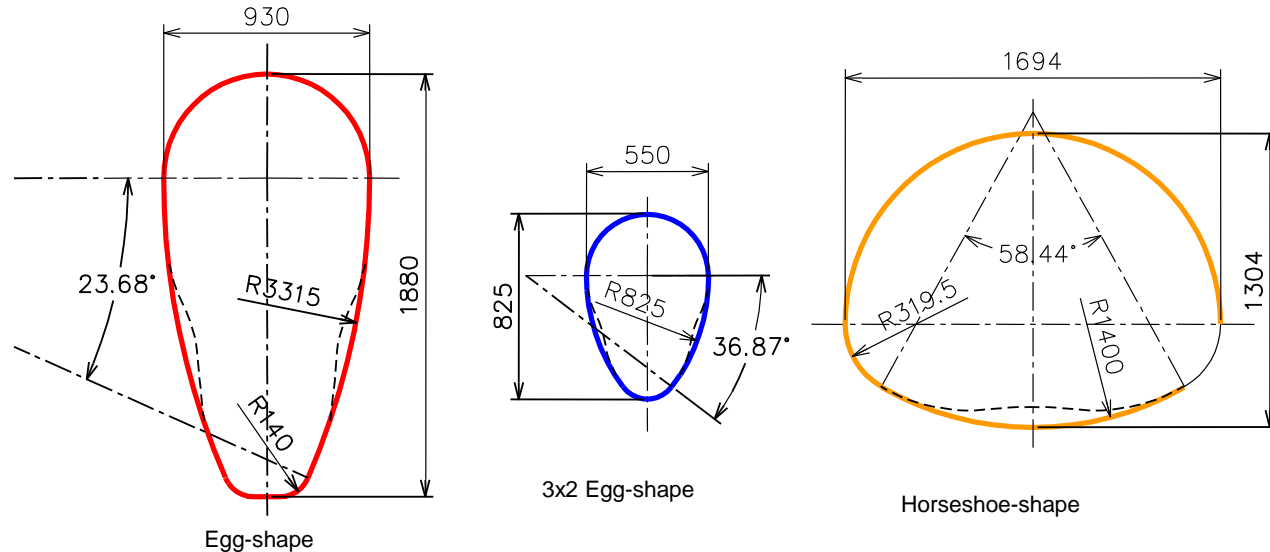
a) Critical: the lobe span decreases over the buckling point

b) Sub-critical: the lobe span increases



# Design vis-à-vis de la nappe

## Cas du non circulaire profil « critique »



Solution purement analytique - pour une paroi pleine et homogène:

$$p_{cr,we} = 0,455 \cdot k^{0,4} \cdot \kappa_p \cdot \frac{E_{50,k}}{1 - \nu^2} \cdot \frac{e^{2,2}}{P^{0,4} \cdot r^{1,8}}$$

$k$ : nombre de lobes de flambement (1 or 2)

$E_{50,k}$ : rigidité annulaire à LT

$E$ : épaisseur paroi

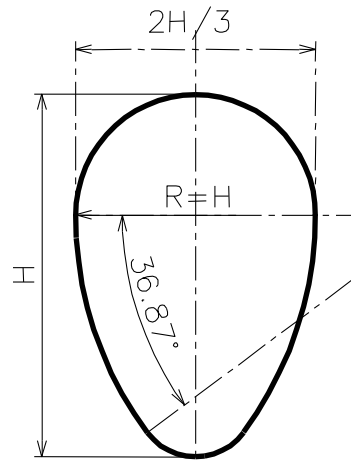
$\kappa_p$ : facteur combiné de réduction pour imperfections

$P$ : périmètre moyen

$R$ : rayon moyen au droit du lobe de flambement

# Illustration pour une paroi pleine et homogène:

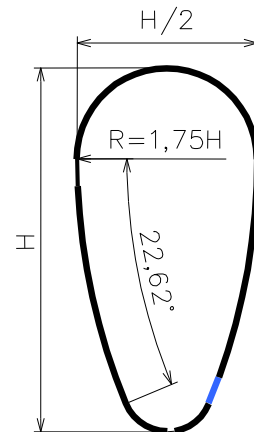
**3X2 (« WRc »)**



$$p_{cr} = 0.308 \cdot k^{0.4} \cdot E_L \cdot \left( \frac{t}{H} \right)^{2.2}$$

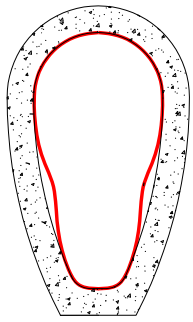
avec  $k=2$  : +31% que pour  $k=1$

**2X1**



$$p_{cr} = 0.116 \cdot k^{0.4} \cdot E_L \cdot \left( \frac{t}{H} \right)^{2.2}$$

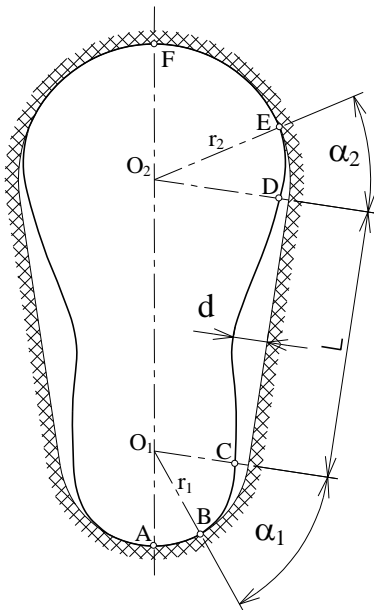
$p_{cr}$  est 2,6 fois plus faible que pour un 3 x 2 de même matériau, même épaisseur et même hauteur



# Design vis-à-vis de la nappe

## Cas du non circulaire profil « sous-critique »

- Résumé de la méthode ASTEE 3R2014
- Calcul des liners sous- critiques
  - Basé sur une déformation limite  $d$



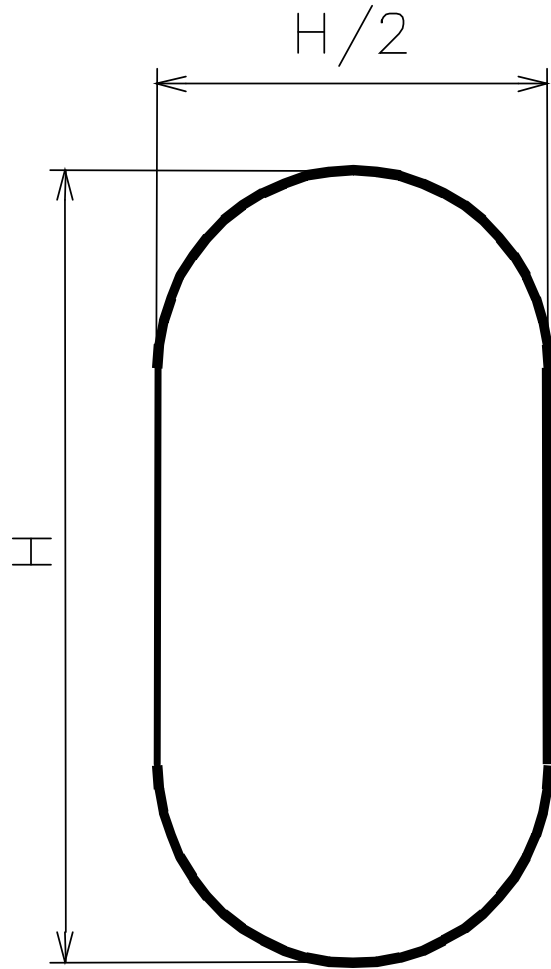
1. Choix de la deflection admissible  $\mathbf{d}$   
( $d \approx 3\%$  de  $L$ )  
(critère de service)

2. Calcul de la pression  $\mathbf{p_s}$ , du moment  
fléchissant  $\mathbf{M}$  et de la compression axiale  
 $\mathbf{N}$  en fonction de  $\mathbf{d}$  (calcul à LT)

3. Vérification de la deflection et de la  
contrainte due à la nappe :  
 $\mathbf{p_w} \leq \mathbf{p_s}$  et  $\mathbf{\sigma} \leq \mathbf{\sigma_R/\gamma_m}$



Illustration pour une forme « ovale » paroi pleine et homogène:

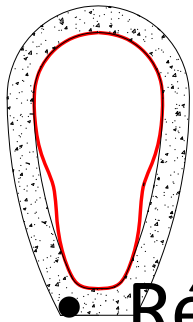


$$p_{3\%} = 1.5 \cdot E_L \cdot \left( \frac{t}{H} \right)^3$$

$$\sigma_{3\%} = 0.31 \cdot E_L \cdot \left( \frac{t}{H} \right) \left[ 1 - 9.9 \left( \frac{t}{H} \right) \right]$$

# Design vis-à-vis de la nappe

## Cas du non circulaire

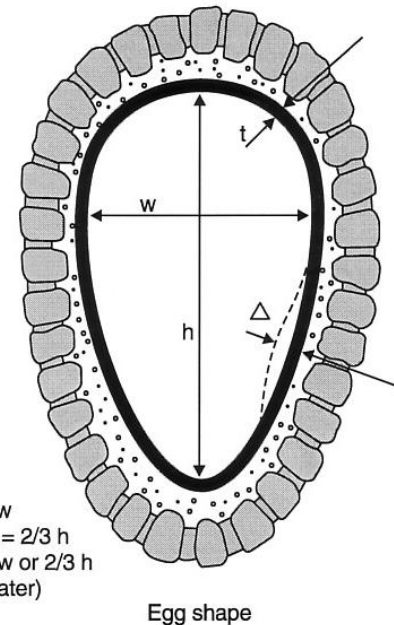


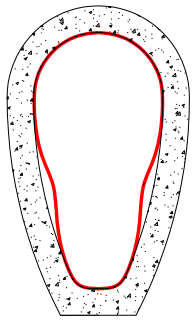
### • Résumé de la méthode WRc type II

- Basée sur un calcul de flexion de poutre
- **La condition de non flambement n'est pas abordée** (le mode de rupture est limité à la défaillance par flexion des flancs)
- 2 conditions doivent être vérifiées:

- Atteinte flexion maximum:  $H_1 = 340s_L (t/l)^2$
  - Atteinte flèche maximale:  $H_2 = R 236 E_L (t/l)^3$
- avec  $H_1$  et  $H_2$  hauteurs de nappe (prise à partir milieu du lobe) limites correspondantes

$$\text{Min}(H_1, H_2) \geq H \quad \text{où } H \text{ est la hauteur de nappe insitu}$$

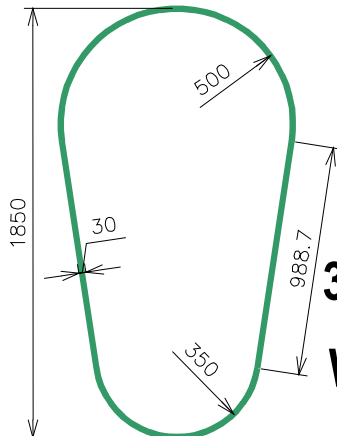
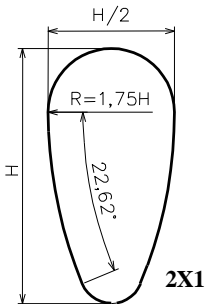
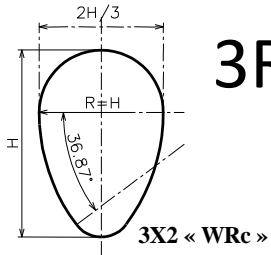




# Comparaison pression critique calculée selon WRc type II et 3R2014

Comparaison résultats WRc avec la méthode 3R2014 (et FEM):

- Ovoïde 3x2: valeurs proches - **OK!**
- Ovoïde 2x1: **différence sensible Hwe calculé avec WRc 1,5 à 2 fois plus élevée** rendant le design **WRc risqué!**
- Ovoïde à flancs droits: **WRc très risqué comme illustré ci-après!**

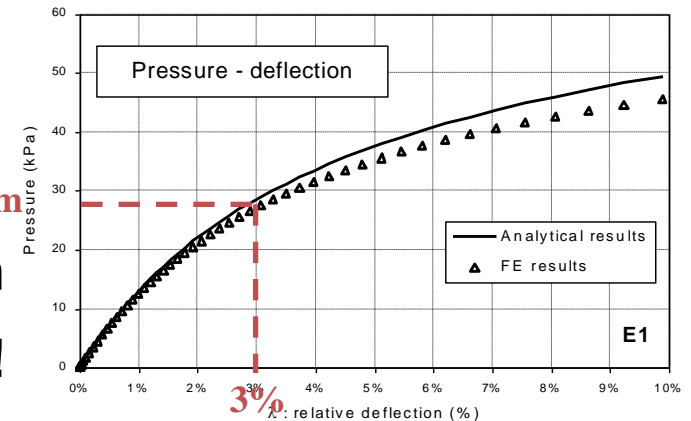


**Hwe max = 2.8 m**

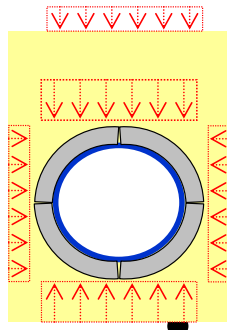
**3R2014 : Hwe max 2,8 m**

**WRc : Hwe max 15,9 m !**

Coque PRV  
 $E_L = 5000 \text{ MPa}$ ,  
 $t = 30 \text{ mm}$ ,  
 $s_L = 60 \text{ MPa}$ ,

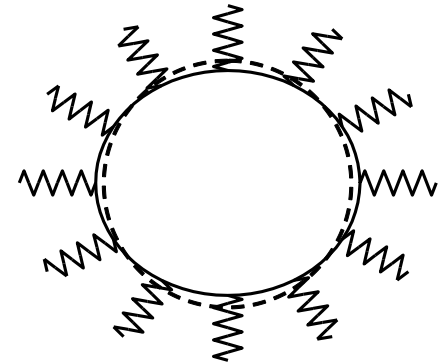


# Design pour autres charges (remblai, trafic,...)



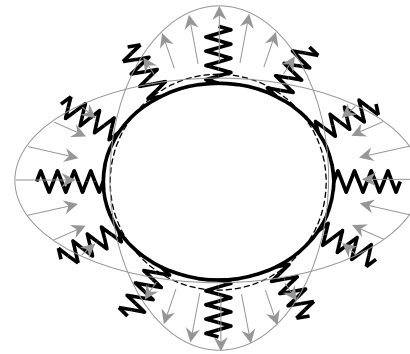
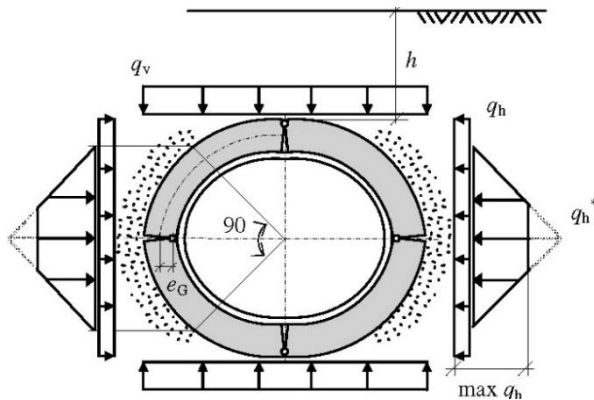
- ASTM F1216 pour “Fully deteriorated pipe”
  - un seul état limite considéré: flambement général
  - $q_t$ : etreinte totale (nappe, sols, trafic)

$$q_t \leq \frac{1}{N} \left[ 32 \cdot R_w B' E'_s \cdot C \cdot \left( EI_L / D^3 \right) \right]^{1/2}$$



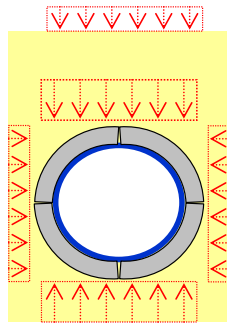
# Design pour autres charges (remblai, trafic,...)

- DWA-A 143-2 – pour état III
  - Modèle sophistiqué (interaction sol-support – modèle de Winkler)



– Abaques ou calcul FEM

# Design pour autres charges (remblai, trafic,...)

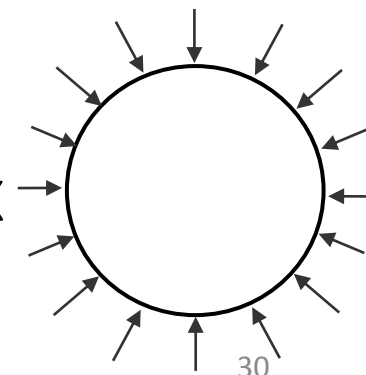
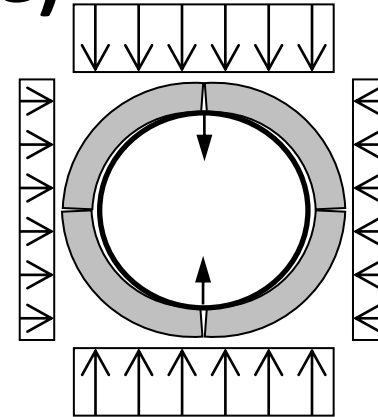


- ASTEE 3R2014 – modèle pour circulaire état II  
**(ouvrage fissure, peu déformé)**

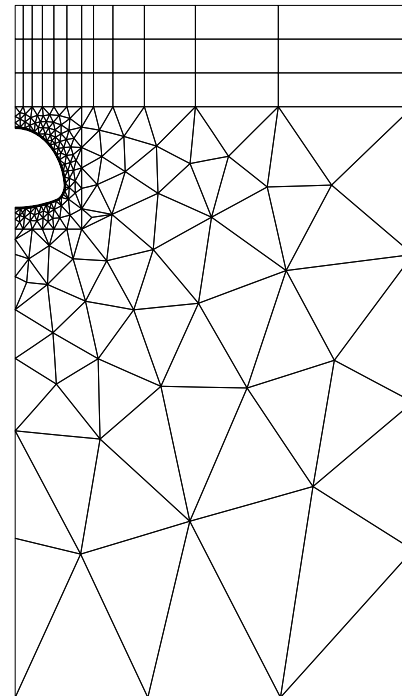
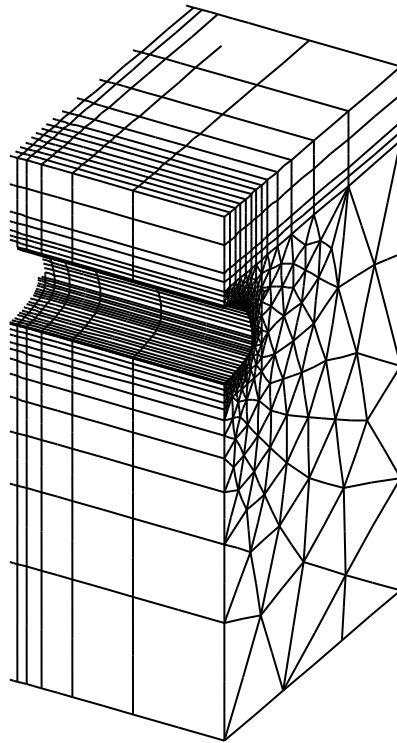
Basé sur les travaux de  
Law & I.D. Moore  
et Einstein-Schwartz

- Pour circulaire état III **(ouvrage en place  
négligé)**

Modèle essentiellement basé sur travaux  
de J Gumbel



- **Pour les non circulaires état III**
  - Méthode FEM 2D ou 3D recommandée en particulier pour sévères conditions (ouvrages de grande taille, de forme complexe, très profonds....)



# Vérification de la sécurité

- **ASTM et WRc: un seul coefficient de 2,0**
- **DWA-A 132 et 3R2014: respect du principe des états limites (Eurocode 0 et annexes nationales):**
  - **Coefficients de sécurité sur actions**
  - **Coefficients de sécurité sur caractéristiques mécaniques du matériau**
  - **Vérification aux ELS et ELU avec combinaison des actions**

**ELU: pression critique et contrainte**

$$\frac{p_{we,d}}{p_{cr,we,d}} \leq 1 \quad \frac{\sigma_{we,d}}{\sigma_{fb,d}} \leq 1$$

**ELS ovalisation, allongement**

$$\frac{\varepsilon_{we,L}}{\varepsilon_{LT}} \leq 1$$



# Logiciel de calcul 3R-2014

Accueil

MENU

- Chemisage circulaire
- Tubage circulaire
- Chemisage non circulaire
- Tubage (avec coulis) non circulaire
- Tubage par enroulement hélicoïdal
- Hydraulique
- Quitter

23.68°

R3315

1880

550

825

R825

36.87°

169

58.4

R319.5

**NOUVELLES RECOMMANDATIONS  
POUR LE DIMENSIONNEMENT DE LA  
RÉHABILITATION PAR CHEMISAGE ET TUBAGE  
DES RÉSEAUX D'ASSAINISSEMENT**

[Conditions d'utilisation](#)

**Logiciel 3R 2014**

astee

Centre National Scientifique  
de Recherche sur l'Assainissement

# Impression écran pour CIPP circulaire

## Chemisage circulaire

MENU MODULES MODE LIBRE

### PROJET

Société : ABC

Référence de l'étude : Reully1

Nom de l'étude : Rue de provence R1-R2

Date : 05 / 09 / 2014



### Etat et géométrie conduite existante

#### ETAT

- Etat I  
 Etat II  
 Etat III

Dimensions   
Di (mm) 400  
De (mm) 480

Ovalisation (%) 3,9

#### Autres imperfections

$\varphi$  (deg) 22,50    w (mm) 19,60

### Caractéristiques du chemisage

#### Désignation commerciale

BBBB

E0,k (MPa) 9000    Epaisseur structurante (mm) 5,3

### Résultats

#### Angle trop important

Voir détails du calcul

### Chargements

#### Charges d'exploitation

Charges permanentes (kN/m<sup>2</sup>)

Autres charges roulantes (kN/m<sup>2</sup>)

#### Charges roulantes

- Tandem TS - Classe 1  
 Tandem TS - Classe 2

#### Nappe

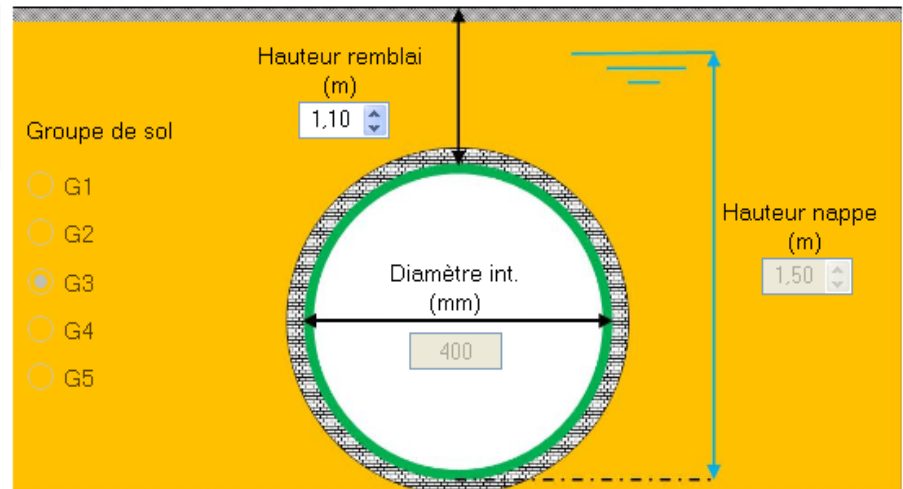
Nappe au niveau TN

### Sol

Sol déjaugé

Poids volumique (kN/m<sup>3</sup>) 20

E (MPa) 2,5    k2 0,2



# Impression écran pour coques PRV

## Tubage (avec coulis) non circulaire

MENU MODULES MODE LIBRE

### PROJET

Société : AAA

Référence de l'étude : Ovo9331675CVnap5

Nom de l'étude : BBB

Date : 10/09/2014



### Etat conduite existante

Etat I  Etat II  Etat III

### Géométrie du tubage

#### Profil

NC sans partie rectiligne  
 NC avec partie rectiligne

Géométrie : Ovoïde

#### Dimensions (mm)

Périmètre : 4251,0

H : 1675,0

L : 933,0

R : 1450,0

R2 : 0,0

R1 : 0,0

l : 0,0

### Caractéristiques du tubage

#### Désignation commerciale

LLLL

E0,k (MPa) : 11000

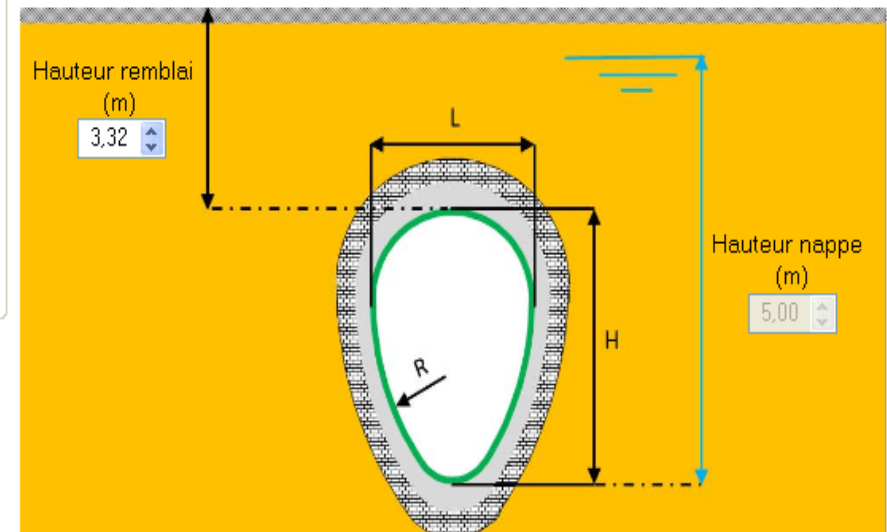
Epaisseur structurante (mm) : 16,8

#### Flèche admissible à long terme

d (mm) : 0,0

### Charges d'exploitation

Nappe   
Nappe au niveau TN



### Résultats

**Le produit convient**

Voir détails du calcul

# Conclusion

- L'ASTM F 1216, le WRc SRM, le DWA A 143-2 et le 3R2014 présentent des différences significatives sur le domaine d'application, les modèles de calcul et l'approche de vérification de la sécurité
- Malgré quelques divergences dans les résultats notamment pour les non circulaires (notamment pour les formes s'éloignant du profil 3 x 2 entre le WRc et le 3R2014) le calcul des liners circulaires vis à vis de la nappe conduisent à des résultats proches
- Le WRc SRM, le DWA A 143-2 and le 3R2014 couvrent une large gamme de liners: circulaires ou non CIPP, coques, tubages...
- Le DWA A 143-2 et le 3R2014 permettent une approche sécuritaire aux états limites conforme aux EUROCODES
- Il est intéressant de noter que le récent **Devis BNQ 1809-400 de 2013** prend en compte l'approche 3R2014 (RERAU) pour les ouvrages non circulaires!