

Dimensionnement du chemisage et du tubage

Nouvelles recommandations françaises

Jean-Michel BERGUE (Animateur Groupe de travail
ASTEE / Directeur Scientifique de la FSTT),
Jean-Marie JOUSSIN (Directeur International de la
FSTT),
Olivier THEPOT (Ingénieur en Chef Eau de Paris)

CONGRÈS
INFRA
2012
19 au 21 novembre
Omni Mont-Royal, Montréal



Dimensionnement du chemisage et du tubage

Nouvelles recommandations françaises

- **Il n'existe pas en France de réglementation concernant les travaux de réhabilitation des conduites d'assainissement.**
- **Les opérateurs de la réhabilitation se réfèrent donc dans leur grande majorité à des recommandations éditées en 1998 par l'AGHTM (devenue depuis ASTEE), les 3R 98 qui contiennent un chapitre consacré au dimensionnement des techniques de chemisage et de tubage.**

Dimensionnement du chemisage et du tubage

Nouvelles recommandations françaises

L'ASTEE a entrepris d'actualiser ce chapitre

- **en intégrant les exigences des normes européennes et internationales et des Eurocodes publiés depuis son édition**
- **en proposant une méthode applicable aux ouvrages non circulaires,**
- **en envisageant la prise en compte de l'ouvrage existant afin d'éviter les surdimensionnements,**
- **en s'intégrant au mieux dans le cadre du projet mené sur le même sujet par le Comité Européen de Normalisation**
- **en s'inspirant des travaux les plus récents sur le sujet.**

Les méthodes actuelles de calcul simplifiées

● Les recommandations ASTM F1216-09 (USA)

● La méthode envisage 2 états d'accueil:

- **Partiellement dégradé** (*partially deteriorated pipe*) : la conduite peut supporter les actions dues au sol et à la circulation. On vérifie la résistance du chemisage au flambement sous nappe.
- **Totalement dégradé** (*fully deteriorated*) : la résistance du tuyau d'accueil est négligée, il retransmet les efforts au chemisage. On calcul le chemisage comme une conduite placée directement dans un remblai.

● Limites d'application

- Méthode limitée aux chemisages (de type *Insituform*®).
- Dans le cas totalement dégradé, le dimensionnement est basé sur une formule de flambement « multi-ondes » très conservatrice et très peu représentative du fonctionnement réel d'une conduite flexible enterrée.



● Les recommandations ATV-M 127 (Allemagne) (en cours de révision)

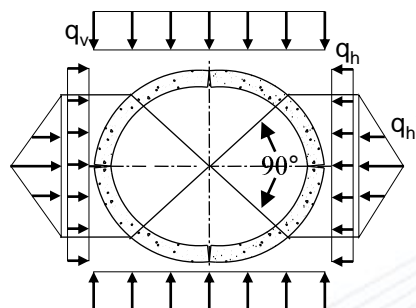


● La méthode envisage 3 états d'accueil:

- **Etat I** : la conduite est structurellement en bon état.
- **Etat II** : la conduite est faiblement dégradée.
- **Etat III** : la conduite est fissurée en clé – rein - radier, idéalisé par quatre voussoirs articulés.

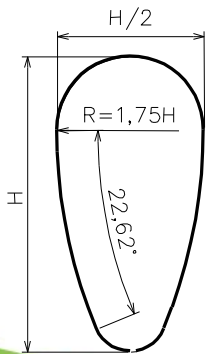
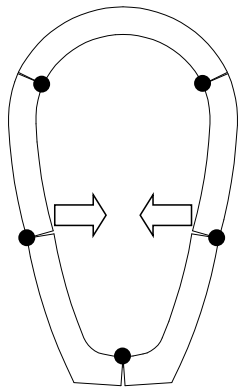
● Limites d'application:

- Méthode bien adaptée aux conduites en béton fissurées (état III) mais peu adaptée au cas d'un matériau fortement dégradé (maçonnerie dégradée, attaque acide ou sulfatique pour le béton).



● La méthode WRc (*Sewerage Rehabilitation Manual*)

● Limites d'application :



- Type I (renfort lié) : une méthode trop simplifiée

La méthode ne nécessite la connaissance que de l'épaisseur de la voûte et n'encourage pas l'utilisateur à mener des investigations sur l'état de la structure et du sol encaissant.

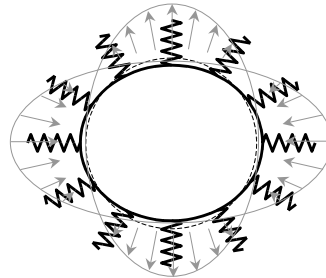
- Type II (renfort plaqué) : des résultats très optimistes pour les formes non-circulaires

Au regard de la pression critique de flambement qui n'est pas évaluée, la méthode donne des résultats trop optimistes pour les ovoïdes dont la forme s'écarte de celle qui a servi à la valider (3x2)

Dans le cas d'un ovoïde 2x1, la méthode WRc donne une hauteur d'eau admissible supérieure à la pression critique de flambement calculée avec la méthode des éléments finis.

○ Les recommandations ASTEE 3R 98

- dérive de la méthode du Fascicule 70 (Réglementation française pour collecteurs d'assainissement posés en tranchée) : modèle interactif sol/structure de Winkler



- s'applique aux chemisages et tubages circulaires
- néglige la résistance mécanique de l'ouvrage existant
- mais prend en compte l'effet de coffrage pour les vérifications de flambement
- suppose que le renfort et le sol sont en interaction parfaite et que les charges dues ou transmises par le sol (charges roulantes) s'appliquent intégralement au renfort

○ Les recommandations ASTEE 3R 98

● Limites d'application :

- la vérification du flambement sous l'effet de la nappe est basée sur la pression critique de flambement d'un tube libre modifiée par un coefficient de coffrage. Cette formule ne permet pas de prendre en compte certaines imperfections (vide annulaire, intrusions...).

Les Recommandations de l'ASTEE prévoient des vérifications spécifiques pour couvrir ces cas.

- la méthode ne s'applique pas au chemisage d'ouvrages circulaires dont l'ovalisation est supérieure à 8%
- ne s'applique pas aux chemisages ou tubages non circulaires (ovoïde, arche,...)
- sont exclues du champ d'application les techniques de rénovation par béton ou mortier projeté.

Les méthodes de calcul simplifiées

<i>Techniques de réhabilitation</i>	<i>CCPP</i>	<i>CCPP</i>	<i>Tubage</i>	<i>Tubage</i>
<i>Ouvrage</i>	<i>Circulaire</i>	<i>Non circulaire</i>	<i>Circulaire</i>	<i>Non circulaire</i>
ASTM F1216	<i>OUI</i>	<i>NON</i>	<i>NON</i>	<i>NON</i>
WRc Type 2	<i>OUI</i>	<i>OUI*</i>	<i>OUI</i>	<i>OUI*</i>
ATV-M 127	<i>OUI</i>	<i>NON**</i>	<i>OUI</i>	<i>NON**</i>
ASTEES 3R98	<i>OUI</i>	<i>NON</i>	<i>OUI</i>	<i>OUI***</i>

* *certaines formes (ovoïde 3x2 ou oval)*

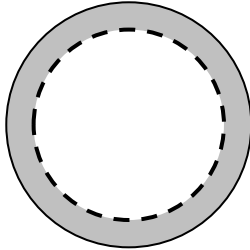
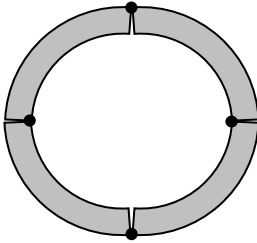
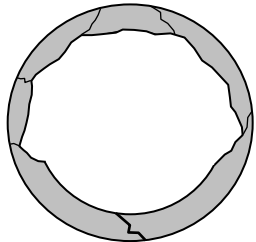
** *vérification aux éléments finis recommandée*

*** *avec réhabilitation circulaire*

Grands principes et originalités de la nouvelle méthode 3R 2012

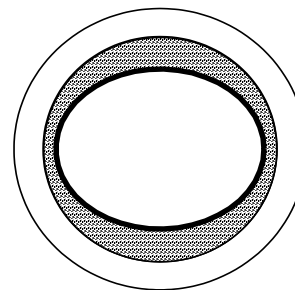
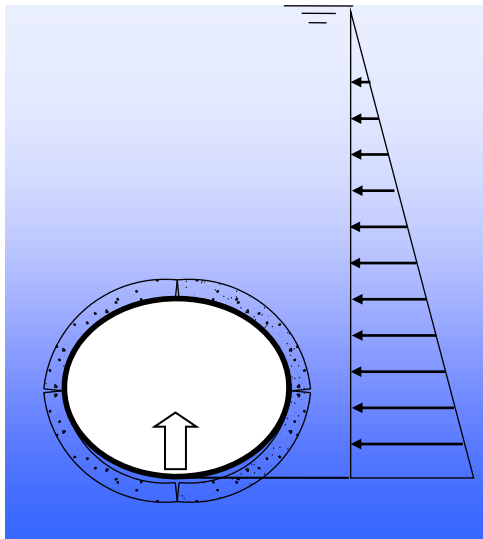
La méthode de calcul 3R2012

3 états d'accueil considérés:

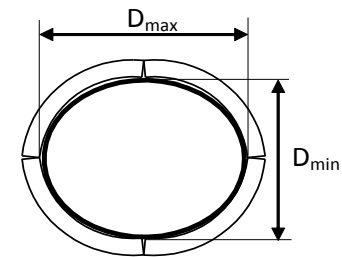
	Etat I	Etat II	Etat III
			
Description de l'ouvrage existant	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Circulaire ou non</u> - Ouvrage non étanche. - Dégradation superficielle du revêtement intérieur. - Etat structurel acceptable. 	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Circulaire</u> - Présence de fissures et/ou déformation importante. - Etat de fissuration simple : au maximum 4 fissures longitudinales (reins, radier et voute). 	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Circulaire ou non</u> - Buses métalliques corrodées. - Maçonnerie fortement dégradée. - Attaque acide ou sulfatique très prononcée pour le béton.
Etat sol / structure	- Capable d'équilibrer l'ensemble des charges sans déformations.	- Capable d'équilibrer l'ensemble des charges <u>avec déformation</u> .	- Incapacité, à terme, d'équilibrer l'ensemble des charges.

La méthode de calcul 3R2012

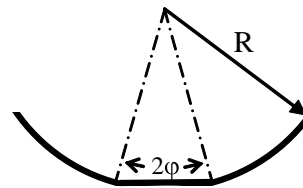
- **Justification des chemisages et tubages circulaires sous l'action de la nappe (état d'accueil I et II)**
 - **Méthode analytique de calcul au flambement qui prend en compte l'interaction renfort-support et les imperfections de formes.**



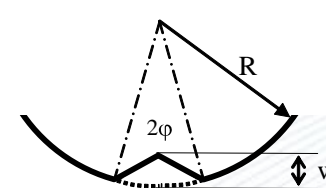
Ovalisation type elliptique



Ovalisation type « 4 rotules »



Méplat



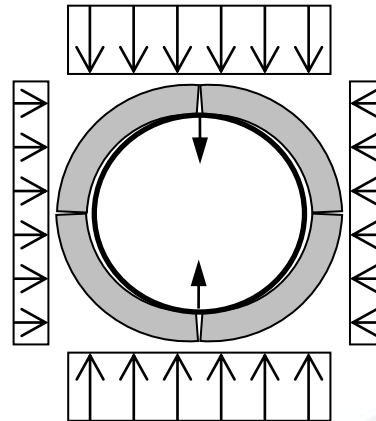
Intrusion

La méthode de calcul 3R2012

○ Justification des chemisages et tubages circulaires pour l'état d'accueil II

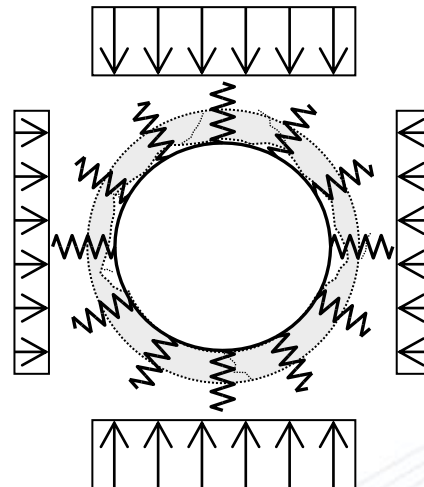
● Méthode analytique basée sur les travaux de I.D. Moore (Queen's University, Ontario, Canada)

- La conduite fissurée se comporte comme une conduite souple en interaction avec le sol.
- Le chemisage (tubage) est soumis à 2 forces concentrées au niveau des fissures en clé et radier.
- L'ovalisation différée diminue la pression critique de flambement sous nappe.



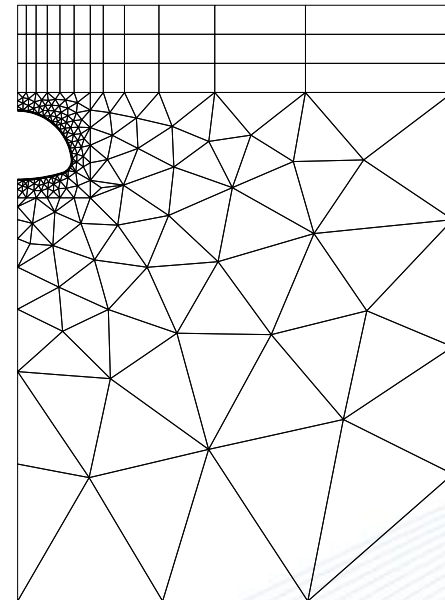
La méthode de calcul 3R2012

- **Justification des chemisages et tubages circulaires pour l'état d'accueil III**
 - **Méthode de calcul dérivée de celle des conduites neuves posées sous remblai (en France dictées par le Fascicule 70).**
 - La résistance du tuyau d'accueil est négligée, il retransmet les efforts au chemisage.
 - On prend en compte l'effet de coffrage pour la vérification au flambement sous nappe.



La méthode de calcul 3R2012

- **Justification des tubages et chemisages non circulaires par la méthode des éléments finis (état III)**
 - Dans le cas des buses métalliques (TTOG), la méthode des éléments finis est recommandée. Permet de modéliser le transfert des charges statiques et dynamiques de la buse vers le tubage.

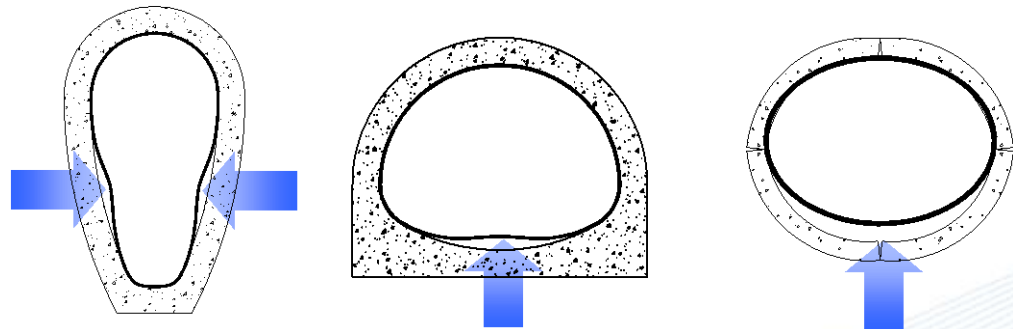
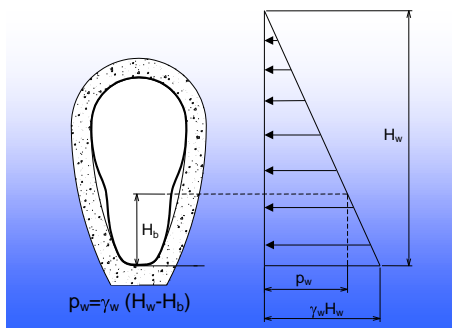


La méthode de calcul 3R2012

Justification des chemisages ou tubages non circulaires sous l'action de la nappe (Etat I)

- Méthode basée sur la pression critique de flambement sous nappe d'un renfort mince, non circulaire et plaqué. Modèle de calcul publié par O. Thépot en 1999 et 2001 :

- Méthode de calcul analytique applicable à une grande variété de formes.



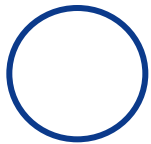
La méthode de calcul 3R2012

Justification des chemisages ou tubages non circulaires sous l'action de la nappe

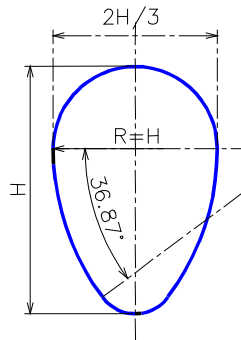
Formulaire de calcul pour les tubes et ovoïdes courants.

Exemples :

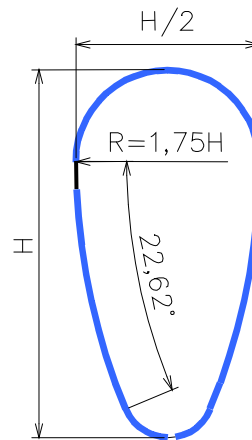
Rappel: pour chemisage ou tubage circulaire encoffré formule de Glock (1977)



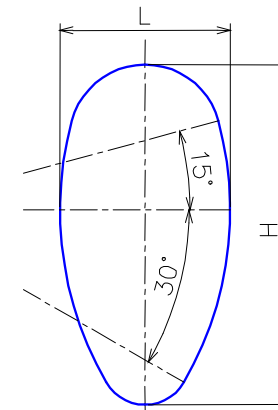
$$P_{cr} = 1,0 \cdot E_L \cdot \left(\frac{t}{D} \right)^{2,2}$$



$$p_{cr} = 0,407 \cdot \kappa_{p,g 1\%} \cdot \frac{E_x}{1 - \nu_T^2} \cdot \left(\frac{e}{H} \right)^{2,2}$$



$$p_{cr} = 0,153 \cdot \kappa_{p,g 1\%} \cdot \frac{E_x}{1 - \nu_T^2} \cdot \left(\frac{e}{H} \right)^{2,2}$$



$$p_{cr} = \frac{1,32}{A^{0,4} B^{1,8}} \cdot \kappa_{p,g 1\%} \cdot \frac{E_x}{1 - \nu_T^2} \cdot \left(\frac{e}{H} \right)^{2,2}$$

$$A = 0,56 + 0,44\lambda$$

$$B = 3,05 - 2,05\lambda$$

$$\lambda = L/H$$

Introduction rationnelle des facteurs d'imperfections de forme:

$$PCr_{def} = \Gamma_{p,g} \cdot \Gamma_{p,w} \cdot \Gamma_{p,ov} \cdot Pcr$$

$\Gamma_{p,g}$
 $\Gamma_{p,w}$
 $\Gamma_{p,ov}$

= réduction pour vide annulaire (gap)
= réduction pour intrusion
= réduction pour ovalisation

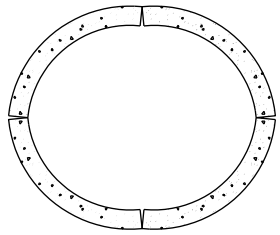
Etudes de cas

Dimensionnement du chemisage et du tubage
Nouvelles recommandations françaises



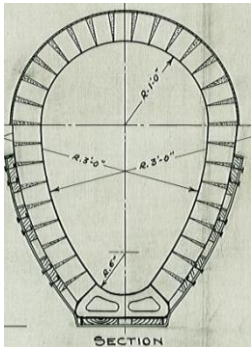
Etude de cas

○ Comparaison des épaisseurs de chemise et de tubage obtenues avec les méthodes 3R2012, ASTM-F1216 et WRc



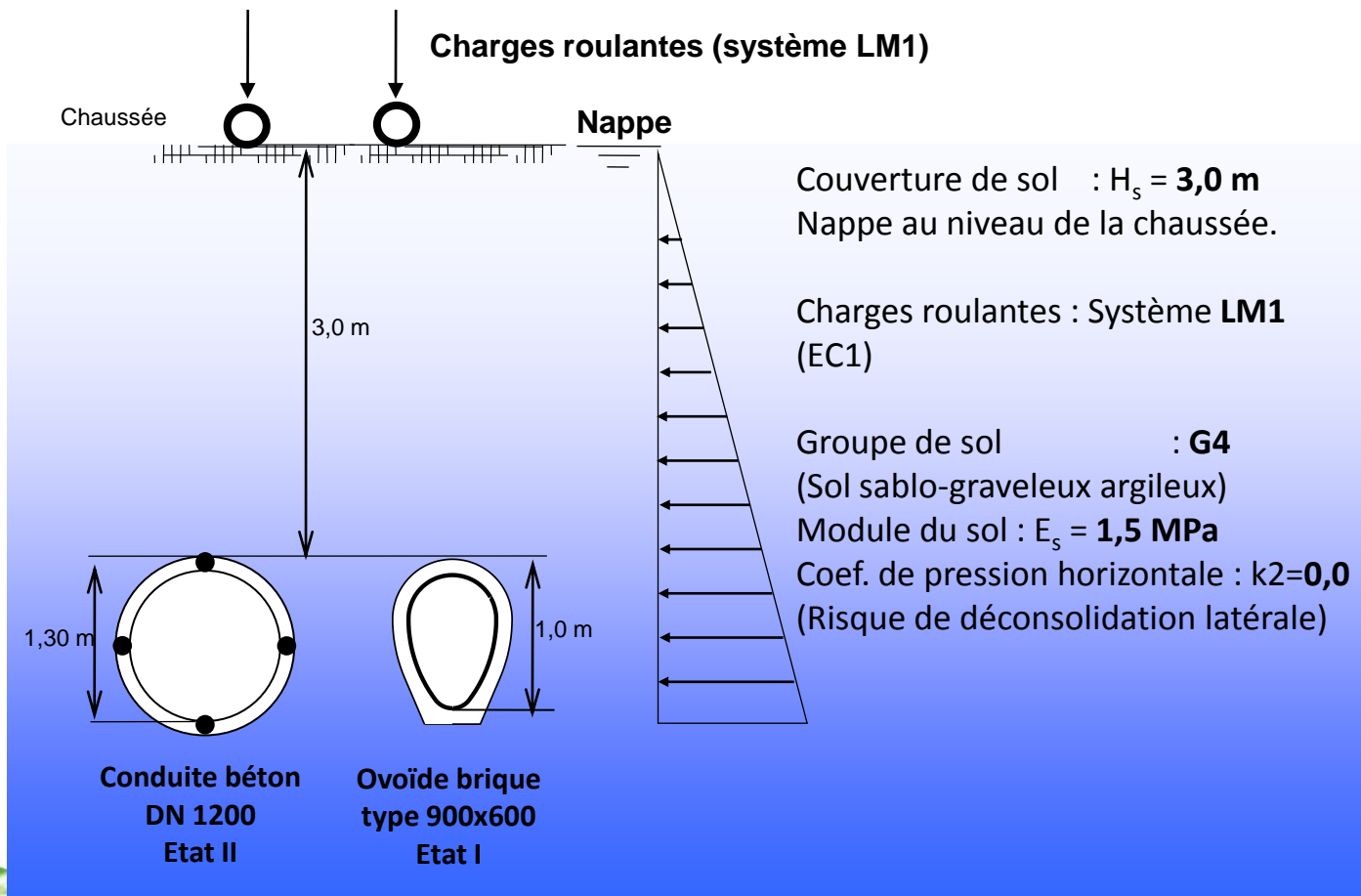
- Cas N°1 : Conduite circulaire en béton de 1200 mm de diamètre enterrée sous la nappe, ovalisée et fissurée (état d'accueil II), réhabilitée par un chemisage polymérisé en place.

- Cas N°2 : Ovoïde en brique type 610x915 mm (2'x3') section typique à Montréal, enterré sous la nappe (état d'accueil I), réhabilité par un chemisage polymérisé en place ou un tubage en coques PRV.



Etude de Cas

Caractéristiques de l'environnement



Etude de Cas

Caractéristiques des renforts

Chemisage

de type *Insituform*®

Epaisseur : **23 mm**

Module long terme : 1200 MPa

Résistance long terme : 15 MPa

Tubage

de type *Hobas*®

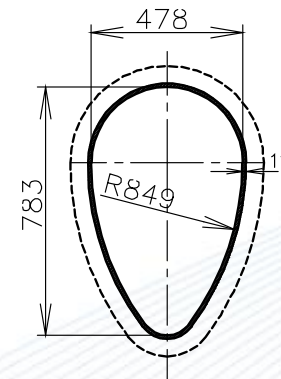
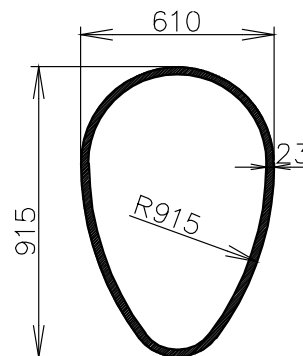
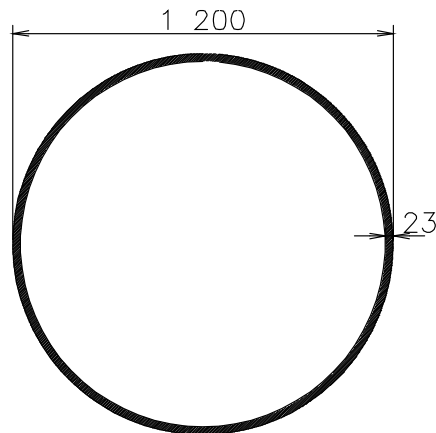
Coque PRV 783x478mm

(coque standard allemande
dim. ext. sur emboiture: environ 823 x 518)

Epaisseur : **9 mm structurel – 11 mm total**

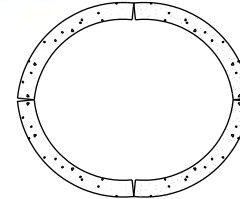
Module long terme : 4800 MPa

Résistance long terme : 70 MPa



Etude de Cas

Comparaison avec les autres méthodes (WRc, ASTM)



Conduite béton DN1200 fissurée.

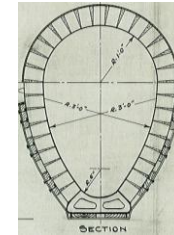
Cas N°1 Conduite DN 1200 fissurée Type de réhabilitation : chemisage polymérisé en place		
Méthode	Epaisseur	Remarque
3R2012	23 mm	Etat II
ASTM 1916-09	22 mm 24 mm 32 mm	« Partiellement Détérioré » « Totalemment D. » E' = 6,9 Mpa* « Totalemment D. » E' = 2,8 Mpa*
WRc	Non couvert par méthode	

* Correspondance classification des sols peu évidente

Etude de Cas

Comparaison avec les autres méthodes (WRc, ASTM)

○ Ovoïde brique 610x915mm (2'x3')



Cas N°2A – Ovoïde 915x610

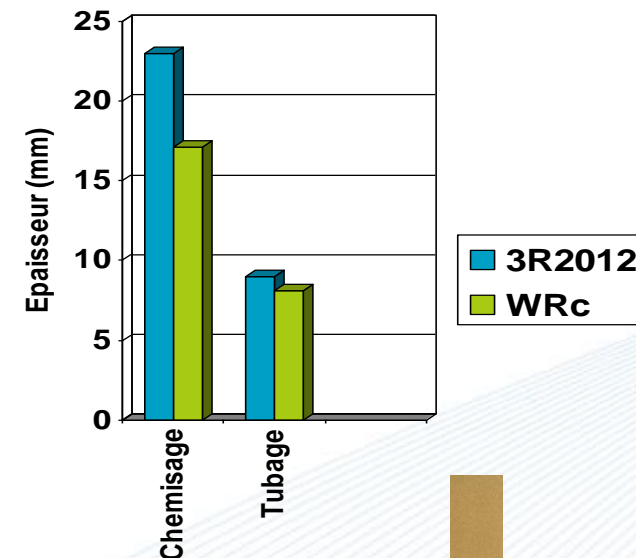
Type de réhabilitation : chemisage polymérisé en place

Méthode	Epaisseur	Remarque
3R2012	23 mm	Etat I
ASTM F 1916-09	Non couvert par méthode	
WRc	17,1 mm	Type II design

Cas N°2B – Ovoïde 915x610

Type de réhabilitation : tubage par coque PRV 783x478mm

Méthode	Epaisseur	Remarque
3R2012	9 mm	Etat I
ASTM F 1916-09	Non couvert par méthode	
WRc	8,1 mm	Type II design



Cas n°3

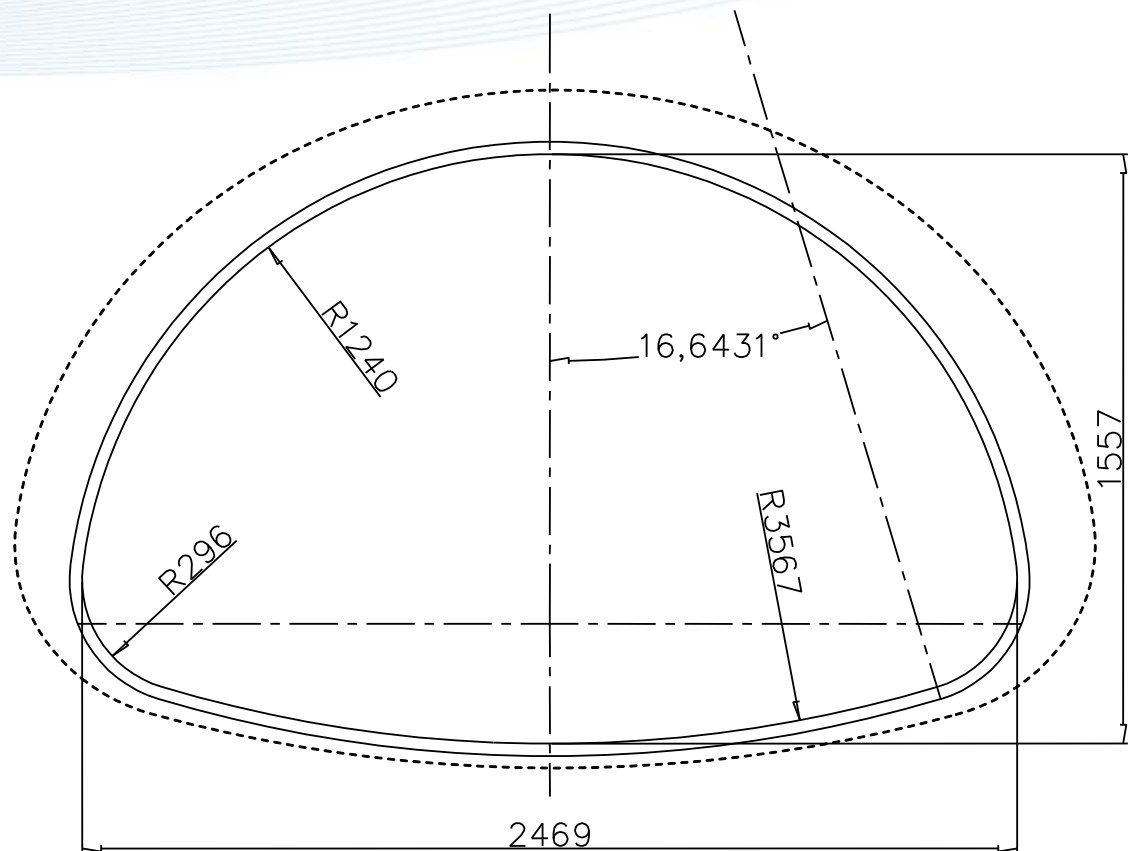
Exemple modèle aux éléments finis pour le calcul d'une buse TTOG arche PRV 2469 x 1557

Etat d'accueil III - couverture 3 m sous autoroute – nappe 0,5 m au dessus extrados

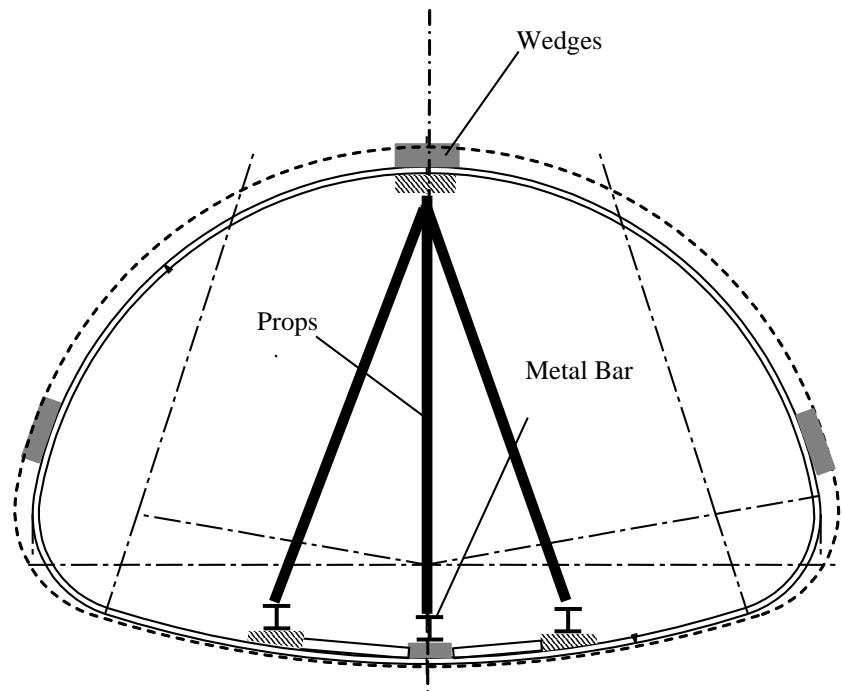


Caractéristiques coque:

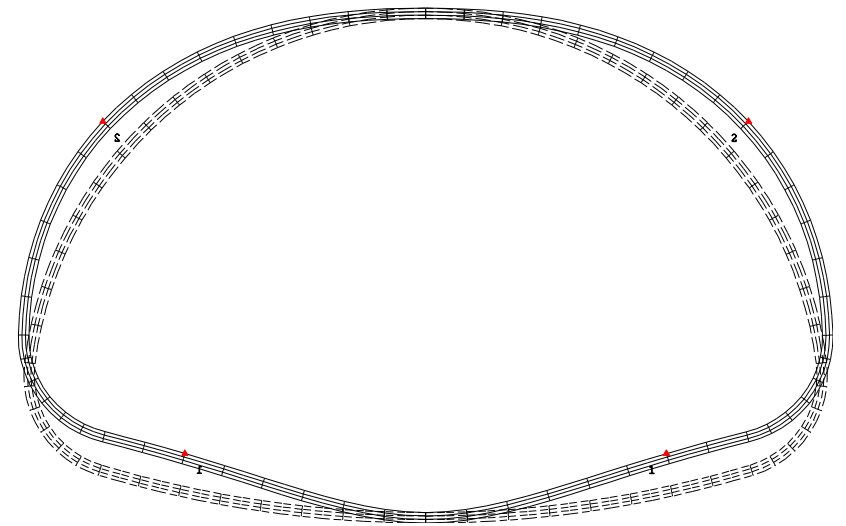
- Matériau : PRV (de type HOBAS)
- H x L : 1557 mm x 2469 mm
- Epaisseur : 33 mm
- Rayon cunette: 3567 mm
- Périmètre moyen : 6500 mm
- Module de Young: 11000 MPa
- Module long terme : 3700 MPa
- Contrainte flexion long terme: 60 MPa



Simulation injection par phase



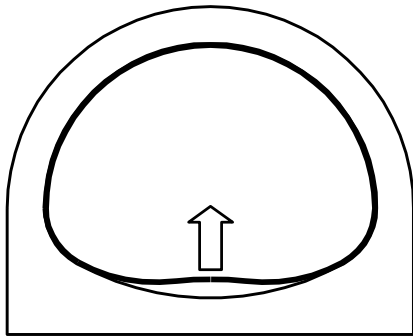
Etalement



Deformation sous l'effet du coulis

Vérification tenue à la nappe phréatique

k = 1



Horseshoe

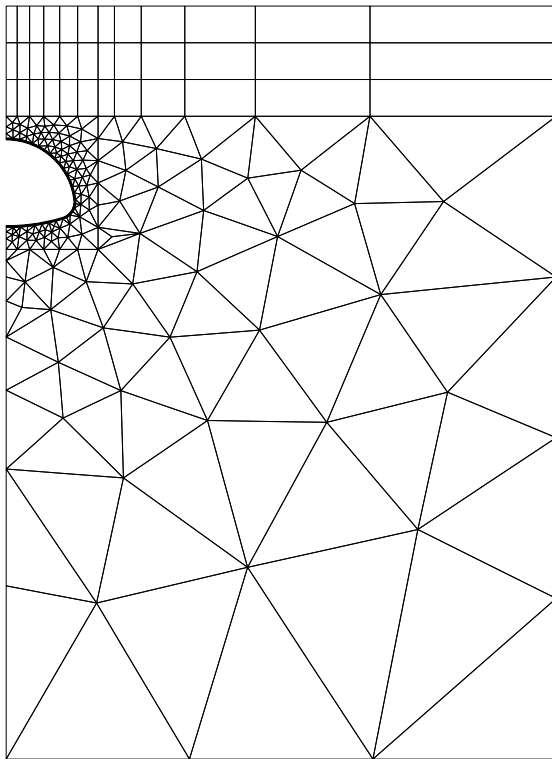
$$p_w = 10 \cdot 1.6 + 0.5 = 21 \text{ kPa}$$

$$p_{cr} = 0,455 \cdot 3700 \cdot \frac{33^{11/5}}{6500^{2/5} 3567^{9/5}} = 44,4 \text{ kPa}$$

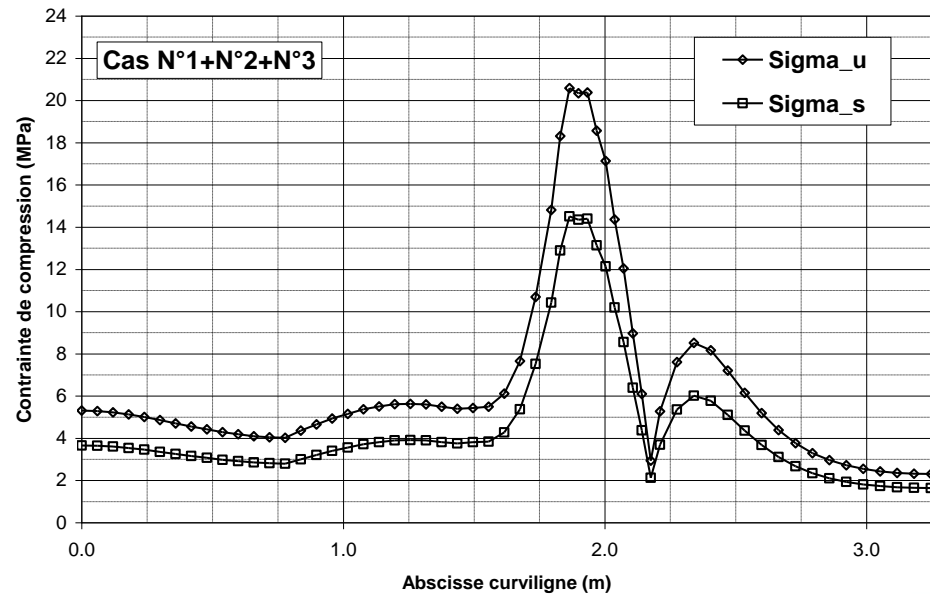
Vérification tenue:

$$21 \leq \frac{44.4}{2}$$

Vérification vis à vis charges du au remblai et aux charges roulantes



Finite element mesh



Bending stress

Contrainte maxi 21 Mpa < 60/1,32

CONCLUSION

- **La nouvelle méthode 3R 2012 répond aux objectifs fixés**
- **Méthode simplifiée s'appliquant à la grande majorité des cas de figure : pathologies courantes des réseaux, techniques de réhabilitation courantes, configurations géométriques diverses des collecteurs, types de chargement, nappe phréatique, environnements géotechniques divers,...**
- **Méthode pouvant s'appliquer de façon quasi universelle moyennant l'ajustement des paramètres aux normes et usages locaux (correspondance classification et états des sols, charges roulantes,...)**

...pourquoi pas au Québec?