

JUSTIFICATION DE COQUES EN PRV PAR MODELISATION AUX ELEMENTS FINIS

DESIGN OF GRP SHELLS BY FINITE ELEMENT MODELLING

Matthieu VRAZINIS¹, Bruno DEMAY², Laurent HESTERS³.

¹ ANTEA GROUP, Antony, France

² ANTEA GROUP, Antony, France

³ AMIBLU, Cergy-Pontoise, France

RÉSUMÉ – La conception des ouvrages hydrauliques en coques en Polyester Renforcé en fibres de Verre fait de plus en plus appel à une justification de la structure par une modélisation aux éléments finis. Plusieurs cas d'étude rapidement présentés ici, effectués par ANTEA pour le compte du fabricant AMIBLU, permettent de mettre en évidence l'importance du rôle joué par une prise en compte réaliste de l'interaction sol-structure (modèle de sols élaborés, gestion de l'interface sol/coque, effet de l'eau, prise en compte de la structure existante dans le cas d'un renforcement...).

ABSTRACT – The design of hydraulic structures with GRP shells very often requires a finite element modeling (FEM). This paper briefly presents some case studies done by ANTEA on behalf of the PRV pipe supplier AMIBLU. These case studies emphasize the importance played in the PRV structural justification by a realistic soil-structure interaction process, including the ground characteristics with elaborated soil behaviors, the effect of water (drainage, consolidation), the presence of the existing structure in case of the refurbishment of a masonry culvert or a steel duct...

1. Introduction

Les coques en Polyester Renforcé en fibres de Verre sont à présent fréquemment employées pour la réalisation d'ouvrages d'assainissement neufs, ou comme renforcement de structures d'ouvrages hydrauliques existants. Offrant une alternative intéressante aux ouvrages structures tuyaux en acier ou béton, l'usage de ces coques est amené à se multiplier jusqu'à devenir une référence pour les ouvrages hydrauliques posés en tranchée, en galerie ou foncés avec un micro-tunnelier.

Elles présentent des géométries diverses, allant d'une section circulaire classique à l'arche en passant par l'ovoïde. La conception de tels ouvrages impose, en plus d'un calcul de résistance mécanique étudié dans une problématique structures, une justification par un calcul d'interaction sol/structure, validant les critères de déformations et de sollicitations.

Lors de la réalisation d'ouvrages neufs en tranchées se pose principalement la question de la modélisation des matériaux d'enrobage, jouant un rôle central puisqu'ils assurent la transmission des efforts à la coque.

Les coques sont également employées dans le cas de confortement d'ouvrage ancien par chemisage à l'intérieur de la structure existante en maçonnerie, acier, béton..., l'espace annulaire étant comblé par un coulis de ciment. L'existant est alors supposé en

ruine et le matériau constitutif remplacé par ceux des horizons géologiques en place, la coque reprenant alors l'intégralité des contraintes du massif du sol. La modélisation aux éléments finis d'un tel cas suppose un phasage finement choisi ainsi qu'une approche réaliste du comportement de la structure existante et des sols en place. Les choix des lois de comportement de sol et de la structure, les paramètres d'élasticité, ainsi que la prise en compte de la consolidation des terrains jouent un rôle prépondérant sur l'allure des résultats.

Le logiciel de calcul aux éléments finis utilisé pour de telles modélisation est PLAXIS.

Au final, l'étude de ces ouvrages via les calculs aux éléments finis donnent les clefs de la compréhension du comportement mécanique d'ouvrages aux géométries complexes et permettent d'étudier l'impact de choix de modélisation sur leurs sollicitations. Ce que permettent difficilement les approches analytiques simplifiées édictées par les règlements et recommandations en vigueur telles que le Fascicule n°70 [1.], contenant les clauses techniques relatives aux ouvrages d'assainissements neufs ou les recommandations ASTEE 3R 2014 [2.] pour le diagnostic et traitement des ouvrages existants.

2. Méthodologie du dimensionnement

2.1 Matériau et géométries

Les éléments de coques sont conçus à partir de résine polyester renforcée de fibres de verre (PRV). Elles comportent également un liner vinylester et un système d'emboîtement à tulipe incorporée. La structure des coques se divise ainsi en quatre couches : un liner, une couche barrière, le PRV avec ajout de sable de silice ainsi qu'une protection extérieure en sable grossier incrusté favorisant l'adhérence d'un coulis injecté dans l'espace annulaire lors de la mise en œuvre.

L'épaisseur nominale à considérer est ainsi la somme des couches barrière et PRV. Les caractéristiques mécaniques, notamment le module d'élasticité en flexion à court terme et à long terme ainsi que les critères de déformations admissibles, sont rappelés dans le tableau 1, extrait de l'avis technique d'AMIBLU 17.2/12-257_V1 [3.]. Le dimensionnement de ce type d'ouvrage s'appuie ainsi sur la vérification des contraintes de flexions et de l'allongement, à court et long terme.

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques des coques PRV

Caractéristiques	Valeur	
Module d'élasticité en flexion à court terme E_{CT}	A court terme	9500 MPa
Contrainte garantie à court terme σ_{CT}		200 MPa
Allongement minimal à court terme ϵ_{CT}		1,60 %
Module d'élasticité de flexion à long terme E_{LT}	A long terme	6000 MPa
Contrainte de flexion à long terme σ_{LT}		80 MPa
Allongement minimal à long terme en milieu acide ϵ_{LT}		0,8 %

De dimensions variant entre 0,3 m et 3,9 m pour la plus grande dimension, les coques PRV présentent une grande variabilité de géométrie afin de s'adapter à tout type d'ouvrage. Les géométries les plus répandues sont circulaires, ovoïdes, ou en forme d'arche, comme l'illustre la figure 1.



Figure 1 : Géométrie des coques PRV Arches (à gauche) et Ovoïde (à droite)

Au cours de l'étude, il est à considérer le mode propre de déformation associé à chaque géométrie. En effet, on retiendra qu'une coque arche a tendance à subir un raccourcissement vertical (écrasement), tandis qu'une coque ovoïde subira un phénomène de raccourcissement horizontal (pincement). Les coques circulaires doivent, quant-à-elles, être étudiées en termes d'ovalisation, combinant un raccourcissement vertical et une extension horizontale.

Les coques sont ainsi modélisées dans le logiciel PLAXIS 2D par un élément plaque, défini par ses produits de rigidité, son coefficient de Poisson et son poids.

2.2 Hypothèses de sol retenues dans le dimensionnement

Pour de tels ouvrages le Fascicule n°70 prévoit, dans le cas de manque d'informations sur les caractéristiques mécaniques du sol, l'utilisation des mêmes modules d'élasticité que pour les matériaux d'apport pour enrobage (reportés au tableau 3). La classe la plus haute, à savoir G1, correspondant aux classifications GTR présentées au tableau 2, présente dans le meilleur des cas un module d'élasticité de 10 MPa seulement.

Tableau 2 : Détails de la nature de la classe G1, extrait du fascicule n°70

Groupe de sol	Description	Matériaux selon NF-P-11300 en état h, m ou s ⁽²⁾
G1	Sables et graves propres, concassés (Dmax < 50 mm). Sables ou graves peu silteuses	D1 D2 D3 DC1, DC2, DC3 ⁽³⁾ B1-B3 C1B1, C1B3, C2B1, C2B3

Tableau 3 : Modules d'élasticités recommandés selon les classes de sol, extraits du fascicule n°70

Niveau de mise en œuvre	Non Contrôlé	Compacté Contrôlé Non Validé	Objectifs de densification recommandés	
			Compacté Contrôlé et Validé q _s ⁽¹⁾	Compacté Contrôlé et Validé q _t ⁽¹⁾
Remarques			Valeur moyenne ⁽³⁾ minimale : 90 % de l'OPN ⁽²⁾	Valeur moyenne ⁽³⁾ minimale : 95 % de l'OPN ⁽²⁾
Groupe de sol	Ec (MPa)	Ec (MPa)	Ec (MPa)	Ec (MPa)
G1	0,7	2	5	10
G2	0,6	1,2	3	7
G3	0,5	1	2,5	4,5
G4	< 0,3	0,6	1,5	3
G5	-	-	-	2

Ces modules d'élasticité sont faibles car les matériaux difficiles à compacter autour du tuyau. Mais à l'échelle du massif de sol ils ne peuvent être pris en compte dans le cadre d'une justification aux éléments finis car elle suppose également la prise en compte de paramètres tels que la cohésion et l'angle de frottement, qui ne sont pas détaillés dans le dit fascicule. Il convient ainsi, pour se rapprocher des conditions réelles, de prendre des paramètres de sols issus non pas du fascicule n°70, mais d'investigations spécifiques, relatives au contexte géotechnique de l'ouvrage... ce dont on dispose rarement. La présence fréquente de remblais argilo-limoneux impose alors des caractéristiques non drainées.

3. Cas de la pose en tranchée

On s'intéresse ici à la réalisation de nouveaux ouvrages hydrauliques constitués de tubes PRV posés dans des tranchées remblayées par la suite. La figure 6 ci-dessous illustre le principe d'une coque ovoïde posée dans une tranchée remblayée.

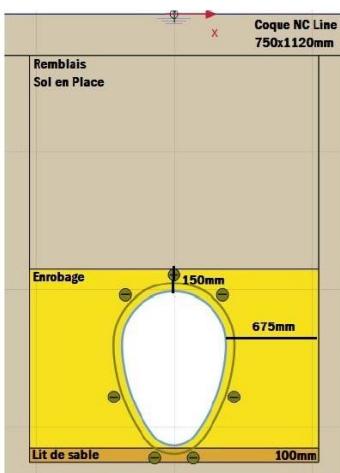


Figure 2 : Schéma de principe de la pose en tranchée

3.1 Phasage de l'étude

Dans ce cas de figure, on retient pour la modélisation aux éléments finis sur le logiciel PLAXIS 2D le phasage suivant :

1. Initialisation des contraintes
2. Applications des surcharges routières au niveau du TN
3. En cas de comportement non drainé : Phase de consolidation des terrains, dans le but de dissiper les surpressions interstitielles, afin d'avoir un historique de la consolidation des terrains. Là encore, le critère d'arrêt de la consolidation est fixé au seuil de 1 kPa
4. Mise en place de la coque PRV avec caractéristiques court terme après creusement de la tranchée et reconstitution de la chaussée.
5. Situation à long terme, les propriétés de la coque sont modifiées pour correspondre à son état à long terme.

NOTA : La réalisation de la tranchée proprement dite est exclue de l'étude car les modes opératoires sont du ressort de l'entrepreneur et non du fournisseur.

3.2 Modèles de sol retenus

A défauts d'investigations géotechniques, le modèle géotechnique retenu consiste en un sol uniforme adoptant les caractéristiques d'un sol de type G1 au sens du fascicule n°70 relatif aux ouvrages d'assainissement. Son module élastique est ainsi établi à 10 MPa, ce qui est faible. Il a également été choisi de le modéliser comme suivant un comportement élasto-plastique avec un critère de rupture de type Mohr Coulomb.

En ce qui concerne les matériaux de remblaiement utilisés généralement, après réalisation de la tranchée, ils se composent d'un lit de sable de 0,1 m d'épaisseur, sur lequel repose la coque PRV, puis d'une couche de matériau d'enrobage recouvrant la coque sur une hauteur de 150 mm au-dessus de la génératrice supérieure, reposant sous une couche de remblais de mêmes caractéristiques que le sol en place. En alternative il est souvent utilisé un matériau auto compactant (MAC) aux caractéristiques d'un remblai sablo-liquide adjuvanté en ciment. Ces matériaux adoptent aussi un comportement élasto-plastique avec un critère de rupture de type Mohr Coulomb.

On constate que les sollicitations sont très dépendantes des valeurs d'interfaces coque/matériau de remplissage/remblai qui restent un sujet d'études compte tenu des multiples combinaisons possibles.

3.3 Influence du modèle de sol sur l'état de contraintes dans la coque

Les caractéristiques du sol (c , φ , E , v) et la gestion de l'interface sol/coque sont les principaux facteurs influant sur les déformations et sollicitations de la coque PRV. L'influence du flUAGE des coques entre les phases court terme et long terme ne produit que peu de déformations supplémentaires étant donné la rigidité relative persistante ($E > 5$ GPa pour les coques, contre $E < 50$ MPa pour les sols).

Dans la pratique, on constate que les coques sont peu sollicitées au regard des valeurs critiques de flambement calculées selon les recommandations structurelles en vigueur.

4. Cas de réhabilitation par chemisage

On s'intéresse dans ce cas à la réhabilitation d'ouvrages hydrauliques endommagés devant être réhabilité par une opération de chemisage. Le tube PRV est dans un premier temps placé à l'intérieur de l'existant avant d'être solidarisé à la structure par l'injection d'un coulis dans l'espace annulaire. La figure 2 ci-dessous illustre le principe.

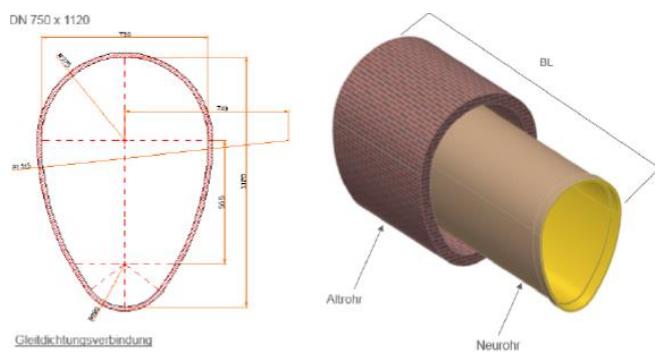


Figure 3 : Schéma de principe du chemisage

Deux cas pratiques seront cités en exemple dans ce paragraphe, la réhabilitation d'une buse métallique sous autoroute et la réhabilitation d'un collecteur d'eaux pluviales en

maçonnerie. Les deux opérations ont été menées par AMIBLU. Les justifications telles que demandées par exemple par les recommandations ASTEE (cas du collecteur) concernent la coque soumise à long terme aux contraintes du massif de sol, en supposant que la structure existante a disparu.

Il est à noter que les ouvrages existants nécessitant un chemisage sont généralement dans un état de type III selon les recommandations ASTEE 3R2014, la structure existante étant fortement dégradée par attaque chimique, corrosion ou abrasion importantes. L'hypothèse de l'assimiler à long terme au sol encaissant est alors justifiée.

4.1 Phasage de l'étude

Dans ce cas de figure, on retient pour la modélisation aux éléments finis un phasage permettant de rendre compte à la fois du comportement de l'existant, du coulis et de la coque PRV. Le phasage retenu sur le logiciel PLAXIS 2D est donc le suivant :

1. Initialisation des contraintes
2. Situation existante en réalisant l'ouvrage en place en désactivant le sol en dedans (modélisation du creusement) et en activant les éléments de l'ouvrage. Cette phase a pour objectif de générer le champ de contraintes dans le massif de sol s'exerçant autour de l'ouvrage.
3. Application des surcharges (routières pour un collecteur sous voirie)
4. Dans le cas d'un comportement non drainé : Phase de consolidation des terrains, dans le but de dissiper les surpressions interstitielles, afin de simuler l'historique de la consolidation du terrain depuis la construction de l'ouvrage. La consolidation s'arrête lorsque les surpressions interstitielles passent sous le seuil des 1 kPa.
5. Mise en place de la coque PRV avec caractéristique à court terme et remplissage de l'espace annulaire par un coulis de ciment.
6. Situation à long terme, les propriétés de la coque sont modifiées pour correspondre à son état à long terme. Le coulis de ciment et la structure existante sont remplacés par le sol en place afin de simuler la transmission des contraintes du sol à la coque.

4.2 Modélisation de l'existant

La tenue du modèle et sa pertinence sont avant tout fonction de la modélisation de l'existant, car les choix de modélisation effectués ont un impact sur l'état de contraintes que sera amenée à reprendre la coque PRV.

Dans le cas de la réhabilitation de la buse sous autoroute, il s'agit d'une buse métallique de type ARMCO Miniplaque 100 présentant des ondulations. La figure 3 rend compte de la géométrie. Les ondulations de la buse étant connues, il est possible de définir sa section de paroi ainsi que sa rigidité suivant les formules données par les documents SETRA [4.]

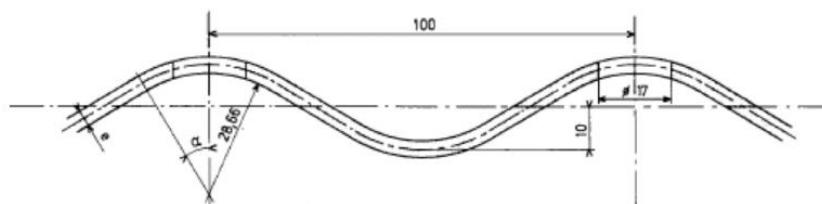


Figure 4 : Géométrie des ondulations de la buse ARMCO Miniplaque 100

La buse ARMCO peut alors être modélisée comme un élément Plaque sous PLAXIS, élément défini par ses produits de rigidité EA et EI (avec E le module élastique de l'acier, A la section de la buse et I son moment quadratique), son coefficient de Poisson et son poids.

En ce qui concerne la réhabilitation du collecteur d'eaux pluviales, se pose le cas de la modélisation du collecteur en maçonnerie dont la géométrie particulière (cf. figure 4), exige un autre choix de modélisation.

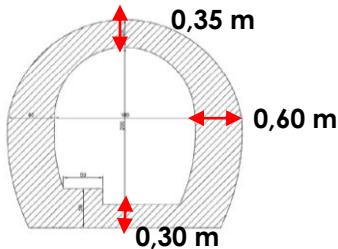


Figure 5 : Géométrie du collecteur

Ce collecteur présente une géométrie ovoïdale dont l'épaisseur est variable, allant de 0,35 m en voûte à 0,60 m latéralement et 0,30 m en radier. Ces épaisseurs sont non négligeables par rapport à l'épaisseur de la couverture. Il a donc été choisi de le modéliser par une solution mixte, associant des polygones de sol et une plaque structurelle fictive.

Etant un ouvrage maçonné en briques hourdées de coulis de ciment, le matériau constitutif du collecteur a été modélisé comme ayant un comportement linéaire élastique, adoptant des caractéristiques pondérales proches de celle du coulis de ciment, ainsi qu'un module élastique équivalent. D'autres modèles sont possibles si l'on souhaite mettre en évidence les points critiques de la structure existante : par exemple, un comportement élasto-plastique pour de la maçonnerie sensible aux contraintes de traction.

Pour tenir compte de la variation d'épaisseur, trois jeux de caractéristiques pour les plaques ont été utilisées, correspondant aux épaisseurs de 0,30, 0,35 et 0,60 m. L'allure du modèle du collecteur existant, après déformation, est présentée en figure 5. La déformée maximale du collecteur après la phase de consolidation vaut environ 15 mm et correspond au tassement général provoqué par la consolidation.

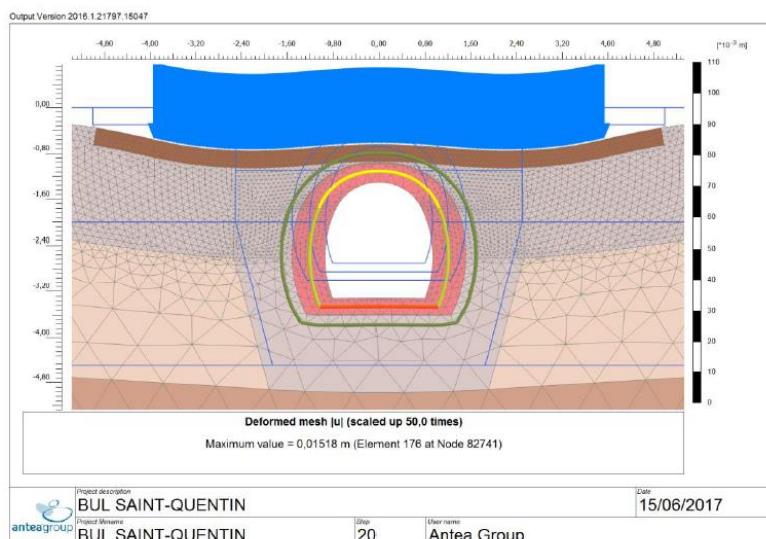


Figure 6 : Déformation du collecteur seul (échelle x50), modèle PLAXIS 2D,

4.3 Modélisation du coulis

En ce qui concerne le coulis de remplissage, il est fait l'hypothèse qu'une fois durci son comportement est celui d'un matériau élasto-plastique dont la résistance à la compression équivalente vaut 10 MPa, soit un module de déformation (module d'Young) de 10 000 MPa.

On constate là aussi que les valeurs des sollicitations dans la coque PRV sont très dépendantes des interfaces coulis/coque et coulis/structure. Les sollicitations dans la coque sont maximales lorsque l'interface coulis/coque est rigide, supposant une mise en œuvre parfaite du coulis dans le vide annulaire entre la coque et la structure existante. L'interface coulis/structure existante est à évaluer au cas par cas en fonction des matériaux rencontrés (acier, maçonnerie, béton...)

5. Conclusion

La justification de coques PRV par une modélisation aux éléments finis suppose la prise en compte d'hypothèses dont les plus influentes sont celles faites sur le sol en place. Les différentes études menées tendent à démontrer la prépondérance d'un **choix judicieux des paramètres de sol et de l'interface sol / coque** sur les sollicitations et déformations de la coque PRV.

D'une manière générale, les résultats obtenus par l'étude MEF d'interaction sol-structure mettent en évidence, par comparaison, la limite des approches analytiques purement structurelles développées dans le Fascicule 70 ou les recommandations 3R 2014.

En l'absence d'investigations in situ, **les données relatives aux caractéristiques de sol issues du fascicule n°70 et les recommandations en découlant doivent être considérées avec précaution**. En effet, le module élastique maximum de sol donné pour la meilleure catégorie G1 est de 10 MPa, ce qui constitue une valeur très faible que l'on attribuerait d'ordinaire à un remblai de très mauvaise qualité, et en tout cas pas à un matériau sélectionné pour l'enrobage, devant faire l'objet d'un compactage soigné. A ce titre nous ne saurions trop insister sur la nécessité de **reconnaissances géotechniques préalables** et d'un **contrôle soigné du compactage des matériaux d'enrobage** après pose de la structure de l'ouvrage.

6. Bibliographie

- [1.] Marchés publics de travaux, CCTG, Fascicule n°70 relatifs aux ouvrages d'assainissements neufs, novembre 2003.
- [2.] Recommandations ASTEE 3R 2014 relatives aux usages d'assainissement et de collectes des eaux pluviales.
- [3.] Avis technique 17.2/12-257_V1 relatif aux coques non circulaires AMIBLU, 2017.
- [4.] Buses métalliques, recommandations et règles de l'art, document réalisé par le LCPC et le SETRA, Septembre 1981