

Dimensionnement de la réhabilitation par chemisage et tubage des réseaux d'assainissement

Chemisage continu polymérisé en place
Tubages par tuyaux continus ou courts ou par enroulement hélicoïdal

Ont participé à la rédaction de ces recommandations au sein de la commission scientifique et technique « Assainissement » et dans le cadre du groupe de travail « Calcul de la réhabilitation », animé par Dominique Orditz (Centre scientifique et technique du bâtiment) :

| | |
|-----------------------|--------------------------------------|
| J.-C. BEHRENS | Cabinet Merlin |
| A. BELIER | Saertex Multicom |
| F. BENALI | Colas, ex-Screg |
| J.-M. BERGUE | Astee |
| J. GUMBEL | JG Pipeline Consultancy |
| J.-M. JOUSSIN | FSTT |
| L. JUGAN | Telerep France |
| E. JUND | Brandenburger |
| J.-C. MARQUANT | EGIS |
| M. MUTTI | Relineurope |
| M.-T. NGUYEN | SADE |
| D. ORDITZ | CSTB |
| L. PAYET | CSTB |
| P. RITTER | Agrippa |
| S. SIDIS | SADE |
| O. THEPOT | Eau de Paris |
| X. THICOÏPE | EBL |
| E. VANDAME | KMG Linertec |
| D. VELTZ | Relineurope |
| C. ZAETTA | Concept Assainissement Environnement |

DRAINFIX® CLEAN
Caniveaux épuratoires pour
traitement des eaux pluviales

PUBLI-INFOS



- Domaines d'applications
 Traitement de l'eau de pluie polluée des voies de circulation, par ex. : parkings, cours, zones industrielles et commerciales, routes à trafic intense
- Principes du traitement de l'eau de pluie
 Les polluants (par ex. les métaux lourds) sont en grande partie liés à des particules très fines.
 La filtration constitue la seule méthode fiable pour retenir ces particules. Le substrat doit être choisi en conséquence.
 Le facteur déterminant de la capacité hydraulique pour la filtration est constitué à long terme par la formation de la couche supérieure de filtration (gâteau de filtration).
 Le coefficient de perméabilité du substrat de filtration évolue suivant et avec la formation de cette couche supérieure.

- Principe de fonctionnement
 Basé sur le principe de filtration par couche (gâteau de filtration).
 Grande capacité épuratoire.
 Réduction des particules > 90 %.
 La grande surface de filtration réduit l'intervalle de maintenance.
 Travaux d'entretien simples et rapides
 Peut-être circulé jusqu'à la classe de charge F900.



hauraton
 SOURCE DE SOLUTIONS
 HAURATON France - 10 Rue Gay Lussac
 ECKBOLSHEIM - 67038 STRASBOURG Cedex 2

Sommaire

Prescriptions générales

| | |
|--|-----------|
| 1. Domaine d'application | 22 |
| 2. Caractéristiques de l'ouvrage existant | 23 |
| 2.1. Mise en œuvre initiale | 23 |
| 2.2. Nature des effluents | 23 |
| 2.3. Pression | 23 |
| 2.4. Géométrie de la section | 23 |
| 2.5. État d'accueil | 23 |
| 2.6. Données hydrogéologiques et géotechniques ... | 25 |
| 2.7. Aspect hydraulique | 26 |
| 3. Justification de la tenue mécanique de l'ouvrage réhabilité | 26 |
| 3.1. Principaux paramètres utilisés dans la méthode de calcul | 26 |
| 3.1.1. Paramètres relatifs à la canalisation existante ... | 26 |
| 3.1.2. Paramètres relatifs à la réhabilitation (chemisage ou tubage) | 27 |
| 3.1.3. Paramètres relatifs à l'environnement et au mode de réhabilitation | 28 |
| 3.2. Détermination des actions | 29 |
| 3.2.1. Pression hydrostatique extérieure p_{we} générée par la nappe | 29 |
| 3.2.2. Pression verticale des terres p_r | 30 |
| 3.2.3. Pression verticale p_{er} due aux charges roulantes .. | 30 |
| 3.2.4. Pressions dues aux autres charges d'exploitation (p_{cp}) | 32 |
| 3.2.5. Pression horizontale p_h des terres | 32 |
| 3.2.6. Pression extérieure p_{inj} ou p_{ext} temporaire due à l'injection du coulis de blocage dans le cas d'un tubage .. | 33 |
| 3.3. Vérification de la sécurité d'emploi | 33 |
| 3.3.1. Résistance de calcul | 33 |
| 3.3.2. Valeurs des coefficients partiels sur les actions .. | 33 |
| 3.3.3. Valeurs des coefficients de sécurité | 33 |
| 3.3.4. Combinaisons d'actions | 34 |
| 3.3.5. Situations de calcul | 34 |
| 3.3.6. États limites ultimes | 34 |
| 3.3.7. États limites de service | 34 |
| 3.4. Vérification de la sécurité d'emploi pour les cas de charge particuliers | 35 |

Partie 1. Cas des sections circulaires

| | |
|---|-----------|
| 4. Justification des tubages sous la pression d'injection du coulis | 35 |
| 4.1. Cas d'un tubage vide | 36 |
| 4.2. Cas d'un tubage rempli d'eau | 36 |
| 4.3. Vérifications à effectuer | 36 |
| 5. Justification des chemisages et tubages circulaires sous l'action de la nappe ... | 36 |
| 5.1. Modèle de calcul | 36 |

| | |
|---|-----------|
| 5.2. Profil de calcul et profil idéalisé | 36 |
| 5.2.1. Profil de calcul | 36 |
| 5.2.2. Profil idéalisé | 37 |
| 5.3. Imperfections de forme | 37 |
| 5.3.1. Imperfections globales | 38 |
| 5.3.2. Imperfections locales | 38 |
| 5.4. Valeurs des imperfections à prendre en compte (état d'accueil I ou II) | 38 |
| 5.4.1. Vide annulaire | 38 |
| 5.4.2. Ovalisation | 38 |
| 5.5. Calcul de la pression critique de flambement ... | 38 |
| 5.6. Calcul des facteurs de correction dus aux imperfections de forme | 39 |
| 5.6.1. Vide annulaire | 39 |
| 5.6.2. Ovalisation de type à quatre rotules (quatre voussoirs articulés) | 39 |
| 5.6.3. Vide annulaire + ovalisation à quatre rotules | 39 |
| 5.6.4. Ovalisation elliptique (tubage) | 40 |
| 5.6.5. Imperfections locales de type méplat ou intrusion | 40 |
| 5.6.6. Chemisages ou tubages circulaires à parois structurées | 41 |
| 5.7. Calcul des contraintes ou allongements | 41 |
| 5.8. Vérifications à effectuer pour le dimensionnement de la réhabilitation | 41 |
| 6. Justification des chemisages et tubages circulaires pour l'état d'accueil II | 41 |
| 6.1. Calcul de l'ovalisation | 42 |
| 6.2. Calcul des sollicitations dues à l'ovalisation différée | 42 |
| 6.3. Combinaison des sollicitations dues à la nappe et à l'ovalisation différée | 42 |
| 6.4. Vérifications | 42 |
| 7. Justification des chemisages et tubages circulaires pour l'état d'accueil III | 42 |
| 7.1. Calcul des sollicitations | 44 |
| 7.2. Flambement multionde | 45 |
| 7.3. Vérifications | 45 |
| | |
| Partie 2. Cas des sections non circulaires | |
| 8. Justification des chemisages ou tubages non circulaires sous l'action de la nappe pour l'état d'accueil I | 45 |
| 8.1. Comportement mécanique des chemisages/tubages soumis à une pression hydrostatique externe | 45 |
| 8.1.1. Cas des profils qui ne comportent que des arcs de cercle | 45 |
| 8.1.2. Cas des profils qui comportent des parties droites .. | 46 |
| 8.1.3. Profils critiques et « sous-critiques » | 46 |
| 8.2. Caractéristiques mécaniques | 47 |
| 8.3. Calcul des profils non circulaires formés d'arcs de cercle | 47 |

| | |
|---|-----------|
| 8.3.1. Profils calculables | 47 |
| 8.3.2. Conditions d'application de la méthode | 47 |
| 8.3.3. Limite de validité des calculs | 47 |
| 8.3.4. Valeurs des imperfections à prendre en compte (état d'accueil I ou II) | 48 |
| 8.3.5. Calcul de la pression critique de flambement | 48 |
| 8.3.6. Calcul des facteurs de correction dus au vide annulaire | 48 |
| 8.3.7. Calcul des sollicitations et des déplacements | 49 |
| 8.4. Vérifications à effectuer pour le dimensionnement de la réhabilitation | 50 |
| 8.5. Calcul des profils non circulaires avec des parties rectilignes | 50 |
| 8.5.1. Formes calculables | 50 |
| 8.5.2. Paramètres géométriques | 50 |
| 8.5.3. Imperfections de forme | 50 |
| 8.5.4. Déformation limite | 50 |
| 8.5.5. Déroulement des calculs | 50 |
| 8.5.6. Limites de validité des calculs | 51 |
| 8.5.7. Paramétrage du lobe de déformation | 51 |
| 8.5.8. Calcul des angles de décollement du lobe | 51 |
| 8.5.9. Vérification de l'angle de décollement | 51 |
| 8.5.10. Calcul de la pression de service et des sollicitations en fonction de la flèche | 51 |
| 8.5.11. Vérifications à effectuer | 52 |
| 8.6. Formulaire de calcul des ovoïdes courants | 52 |
| | |
| 9. Justification des chemisages ou tubages non circulaires pour l'état d'accueil II | 53 |
| 9.1. Cas des chemisages | 53 |
| 9.1.1. Cas de divergence des piédroits (ou affaissement de voûte) | 53 |
| 9.1.2. Cas de convergence (bombement) d'un ou des deux piédroits | 53 |
| 9.2. Cas des tubages injectés | 53 |
| | |
| 10. Justification des chemisages ou tubages par étude aux éléments finis pour l'état d'accueil III | 53 |
| 10.1. Contribution de l'ouvrage existant | 53 |
| 10.2. La méthode des éléments finis | 53 |
| 10.3. Caractéristiques recommandées du modèle aux éléments finis | 54 |
| 10.3.1. Lois de comportement | 54 |
| 10.3.2. Maillage | 54 |
| 10.3.3. Déroulement des calculs | 54 |
| 10.4. Module de déformation du sol | 54 |
| 10.5. Contenu du rapport d'étude | 54 |
| | |
| Bibliographie | 55 |
| | |
| Annexes | |
| Annexe 1. Notations et symboles | 57 |
| Annexe 2. Exemples de calculs | 60 |

Introduction

Il n'existe pas en France de réglementation concernant les travaux de réhabilitation des conduites d'assainissement. Le Fascicule 70 du Cahier des clauses techniques générales (CCTG), qui fixe une doctrine technique commune pour les ouvrages d'assainissement d'eaux usées et/ou d'eaux pluviales applicable aux marchés publics de travaux (ou qui y font référence), est uniquement dédié aux travaux neufs. Les opérateurs de la réhabilitation se réfèrent donc dans leur grande majorité aux recommandations éditées en 1998 par l'Astee (ex-AGTHM), qui contiennent un chapitre consacré au dimensionnement des techniques de chemisage et de tubage (chemisages continus polymérisés en place et tubages¹ avec espace annulaire par tuyaux continus ou courts ou par enroulement hélicoïdal).

L'évolution des techniques et des pratiques a amené l'association à rassembler un groupe de travail pour actualiser et compléter le chapitre existant dans les recommandations 3R 98 (méthode dite « simplifiée » qui néglige les caractéristiques mécaniques de la canalisation existante) :

- 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 prenant en compte l'ouvrage existant afin d'éviter les surdimensionnements et en précisant les conditions d'utilisation et/ou le domaine d'emploi de cette option. Les évolutions essentielles par rapport à la version 1998 sont la prise en compte :
 - de l'état d'accueil :
 - état I : le tuyau d'accueil est structurellement en bon état et reprend l'ensemble des charges. La méthode proposée est basée sur le modèle de Glock déjà développé dans le cadre du programme national Rerau, avec la prise en compte de la nappe ;
 - état II : le tuyau d'accueil est fissuré avec au maximum quatre fissures longitudinales. La solution analytique est basée sur le modèle de I.D. MOORE, qui a été établi à partir d'expérimentations ;

- état III : le tuyau d'accueil est considéré comme totalement dégradé et assimilable au sol encaissant. On utilise les solutions analytiques d'EINSTEIN et SCHWARTZ et de J. GUMBEL, vérifiées expérimentalement, ainsi que les caractéristiques du sol telles que définies dans le Fascicule 70 ;

- des sections non circulaires en proposant :
 - une méthode analytique établie par O. THÉPOT dans le cadre du programme national Rerau pour des cas particuliers ;
 - le recours à une étude aux éléments finis en précisant son contenu et ses caractéristiques. Cette approche est tout particulièrement recommandée pour les ouvrages de grandes dimensions, les altérations importantes et/ou évolutives des matériaux, les conditions de chargement particulièrement sévères. La nouvelle méthode de calcul est proposée sous la forme d'un CD-Rom accompagné d'une notice d'utilisation détaillée et d'un outil de calcul, disponible fin 2014 et vendu au prix de 350 € HT.

Prescriptions générales

1. Domaine d'application

La conception et le calcul des ouvrages réhabilités (canalisations principales et de branchements) comprennent le dimensionnement hydraulique et la justification de la tenue mécanique.

L'objectif de la justification de la tenue mécanique est la détermination de l'épaisseur de dimensionnement² de la nouvelle canalisation pour une durée de vie attendue de l'ouvrage de 50 ans. Elle est basée sur la prise en compte des caractéristiques de la canalisation existante et de celles de la nouvelle canalisation. Dans tous les cas, la méthode prescrit les actions à prendre en considération incluant une hauteur de nappe minimale.

La présente méthode de dimensionnement s'applique aux techniques de réhabilitation utilisant des produits en matériaux thermoplastiques – polychlorure de vinyle (PVC), polyéthylène (PE)... – préfabriqués ou mis en forme *in situ* ou composites thermodurcissables constitués d'une résine et d'une matrice, préfabriqués ou polymérisés *in situ*.

¹ Tubages continus par tubes polymérisés sur place au sens de la norme NF EN ISO 11296-4.

² Cette épaisseur est inférieure à l'épaisseur totale de la nouvelle canalisation.

Les produits concernés sont les chemisages continus polymérisés en place et tubages avec espace annulaire par tuyaux continus ou courts ou par enroulement hélicoïdal³.

Sont exclues du champ d'application de la méthode les techniques :

- de réhabilitation par matériau projeté ou coulé en place, par coque souple avec injection ou coques multiéléments reconstituées par laminage ou collage ;
- d'injection en vue de rétablir la seule étanchéité de la canalisation existante ;
- qui n'ont pour seul objet que la restauration de l'hydraulicité de la canalisation existante.

2. Caractéristiques de l'ouvrage existant

2.1. Mise en œuvre initiale

L'ouvrage existant doit être enterré.

2.2. Nature des effluents

L'ouvrage à réhabiliter est conçu en général pour véhiculer des effluents domestiques ou assimilés ou des eaux pluviales conformes à la réglementation.

Dans le cas d'effluents industriels, il convient de prendre en compte les propriétés des matériaux en fonction des caractéristiques chimiques et de la température des effluents.

2.3. Pression

La pression hydraulique intérieure des effluents véhiculés par le réseau existant est limitée à la hauteur d'eau correspondant au débordement des ouvrages d'accès.

2.4. Géométrie de la section

La présente méthode de dimensionnement s'applique à des ouvrages de section circulaire (Partie 1) ainsi qu'à certains ouvrages non circulaires courants : ovoïdes, ovales, dalots, arche (Partie 2).

2.5. État d'accueil

La méthode permet d'envisager différentes hypothèses pour l'état de dégradation de la canalisation d'accueil. Ces hypothèses doivent être justifiées par les conclusions de l'étude préalable à la définition de l'offre.

On distingue (*tableau I*) :

- **État I** : le tuyau d'accueil est structurellement en bon état et reprend l'ensemble des charges.

Dans cet état la réhabilitation est envisagée pour rétablir l'étanchéité au niveau des assemblages et résister aux effets de la nappe.

- **État II** : dans le cas d'ouvrage circulaire, le tuyau d'accueil est fissuré avec au maximum quatre fissures longitudinales (aux reins, au radier et en voûte) avec une ovalisation limitée à 10 % (à considérer pour la mise en œuvre d'un chemisage). Il peut reprendre des efforts normaux, mais pas les efforts de flexion. L'absence d'effondrement indique un état d'équilibre, à ce stade, entre le sol et la canalisation.

Dans le cas des ouvrages non circulaires, l'état II concerne des ouvrages fissurés et/ou déformés dont le matériau présente une résistance non négligeable à la compression, capables de reprendre l'intégralité des efforts normaux.

En ce qui concerne les ovoïdes, on observe deux cas principaux de déformation associés à des schémas de fissuration caractéristiques :

- cas de divergence des piédroits (ou affaissement de voûte) : la divergence des piédroits s'accompagne généralement d'une ou plusieurs fissures longitudinales ouvertes en voûte et en radier et parfois de fissures fermées dites de « compression » au niveau des naissances (*figure 1*).

La divergence des piédroits peut être due à un manque de butée latérale, c'est-à-dire à une pression horizontale insuffisante du sol par rapport à la pression verticale.

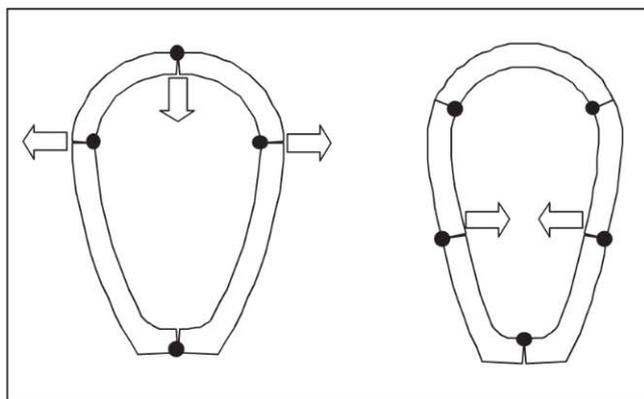
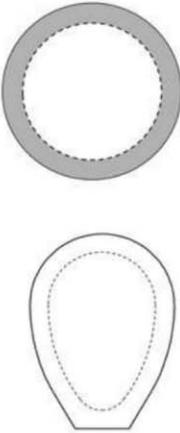
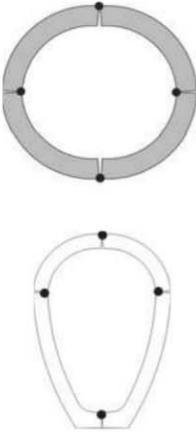
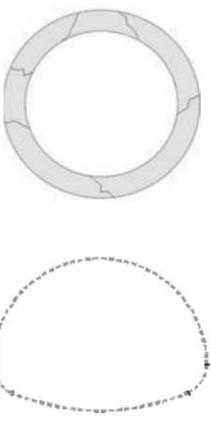


Figure 1. Divergence et convergence des piédroits

³ Ces produits relèvent des normes NF EN 13566-2, NF EN ISO 11296-3, NF EN ISO 11296-4, NF EN ISO 11296-5 et NF EN ISO 11296-7 [Voir annexe 2]

| | État I | État II | État III |
|--|---|---|---|
| |  |  |  |
| Matériaux de l'ouvrage existant | Tout matériau | Matériau à comportement rigide enclin à se fissurer (béton, grès, maçonnerie, fibre-ciment...) | Tout matériau |
| Description de l'ouvrage existant | <ul style="list-style-type: none"> – Ouvrage non étanche – Ouvrage avec dégradation superficielle du revêtement intérieur – Ouvrage dont l'état mécanique est acceptable – Pas de fissures visibles – Ovalisation < 10 % pour une canalisation flexible | <ul style="list-style-type: none"> – Présence de fissures et/ou déformation importante – Ovalisation < 10 % (si mise en œuvre de chemisage circulaire) | <ul style="list-style-type: none"> – Dégradation importante du matériau – Attaque acide ou sulfatique profonde pour le béton ou fibre-ciment – Buses métalliques corrodées – Maçonnerie fortement dégradée |
| État sol/structure | – Capable d'équilibrer l'ensemble des charges sans déformation excessive | – Capable d'équilibrer l'ensemble des charges avec déformation | <ul style="list-style-type: none"> – Incapacité, à terme, d'équilibrer l'ensemble des charges – Résistance en compression considérée comme insuffisante |
| Actions à considérer pour le dimensionnement de la réhabilitation | Nappe | Nappe, sol, charges d'exploitation | |
| Vérifications à effectuer pour le dimensionnement de la réhabilitation | <ul style="list-style-type: none"> – Flambement local (pression d'eau extérieure) – ELU de résistance (pression d'eau extérieure) – ELS de déformation (pression d'eau extérieure) | <ul style="list-style-type: none"> – Flambement local (pression d'eau extérieure) – ELU de résistance (ensemble des charges) – ELS de déformation (ensemble des charges) | <ul style="list-style-type: none"> – Flambement général (ensemble des charges) – Flambement local (pression d'eau extérieure) – ELU de résistance (ensemble des charges) – ELS de déformation (ensemble des charges) – Dimensionnement proche de celui d'une canalisation posée en remblai indéfini (cf. Fascicule 70) |
| Paramètres à prendre en compte pour le dimensionnement de la réhabilitation | Caractéristiques géométriques et défauts géométriques de l'ouvrage existant | Ouvrage existant : résistance à évaluer | Géométriques et mécaniques du nouvel ouvrage |

ELU : état limite ultime ; ELS : état limite de service.

Tableau I. Définitions des différents états de l'ouvrage existant, paramètres à prendre en compte et vérifications à effectuer

La présence de fissures de compression est le signe d'un dépassement de la résistance en compression du matériau. Elle présente un caractère de gravité qui doit nécessairement mener à une évaluation de la stabilité de l'ouvrage ;

– cas de convergence (bombement) d'un ou des deux piédroits : la convergence des piédroits s'accompagne généralement de fissures longitudinales ouvertes dans la zone des piédroits, et éventuellement multiples (figure 1).

La convergence des piédroits peut être due à un excès de pression horizontale du sol.

Remarque : les affaissements de voûtes sont plus rares dans le cas des ovoïdes que dans le cas des ouvrages circulaires. *A contrario*, les convergences des piédroits, ou ovalisation négative, sont exceptionnelles pour les ouvrages circulaires qui résistent bien aux poussées latérales, mais elles sont relativement fréquentes dans le cas des ovoïdes.

Dans cet état, la réhabilitation est envisagée pour stopper les causes de la dégradation : défauts d'étanchéité dégradant les propriétés de l'enrobage, sous-dimensionnement mécanique de l'ouvrage initial, mauvaises conditions de mise en œuvre...).

- **État III** : le tuyau d'accueil est dégradé par attaque chimique, corrosion ou abrasion importantes. Il est assimilable au sol encaissant et transmettra les charges à la nouvelle canalisation.

Chaque état correspond à un type de dégradation différent et ne doit pas être apprécié en matière de gravité.

Note : un ouvrage circulaire dont l'ovalisation initiale est supérieure ou égale à 10 % avant réhabilitation ne permettra pas de répondre aux prescriptions du Fascicule 70 portant sur les ouvrages neufs.

Remarque : en l'absence de réhabilitation, tout état est susceptible d'évoluer défavorablement en fonction du niveau d'agressivité que subit l'ouvrage et de l'évolution de son environnement.

2.6. Données hydrogéologiques et géotechniques

Les données hydrogéologiques et géotechniques sont fournies à l'entreprise par le maître d'ouvrage ou son représentant au stade de l'appel d'offres.

Elles résultent d'une étude géotechnique préliminaire de site de type G11 ou d'un diagnostic géotechnique

de type G5 (selon la norme NF P 94-500), éventuellement complétée par des investigations *in situ*. Ce type d'étude fait normalement partie du diagnostic de la canalisation à réhabiliter.

L'étude préliminaire de site est fondée sur la consultation des cartes géologiques et des bases de données géotechniques du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). Elle comprend au minimum :

- un profil en long géologique avec les niveaux de la nappe. Ce profil doit permettre d'identifier les principales formations et notamment le sol encaissant, le sol d'assise proche et lointain et le sol de couverture de la conduite à réhabiliter ;
- une identification et une évaluation des risques, notamment : cavités, argiles gonflantes, inondations, tassement (sols compressibles).

Chaque risque doit être évalué, par exemple, selon trois niveaux (faible, moyen, fort).

L'étude préliminaire de site doit être complétée par une étude géotechnique dont l'objectif est de caractériser le sol encaissant en précisant :

- les types de sols rencontrés identifiés selon la norme NF P 11-300 : une classification en groupes, conforme au Fascicule 70 du CCTG (tableau II), a été

| Groupe de sol | Description | Matériaux selon NF P 11-300 en état humide, moyen ou sec |
|---------------|--|--|
| G1 | Sables et graves propres, concassés (D _{max} <50mm). Sables ou graves peu silteux | D1 D2 D3 DC1, DC2, DC3 B1-B3 C1B1, C1B3, C2B1, C2B3 |
| G2 | Sables ou graves peu argileux | B2-B4 C1B2, C2B2, C1B4, C2B4 |
| G3 | Sables et graves très silteux, limons peu plastiques, sables fins peu pollués (IP < 12) | A1 B5 C1A1, C2A1, C1B5 |
| G4 | Sables et graves argileux à très argileux, sables fins argileux, limons argiles et marnes peu plastiques (IP < 25) | A2 B6 C1A2, C2A2 C1B6, C2B6 |
| G5 | Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques (IP > 25) | A3, C1A3, C2A3 A4, C1A4, C2A4 |

IP : indice de plasticité.

Tableau II. Classification des sols selon la norme NF P 11-300

réalisée dans le but de réunir entre elles les classes de sols susceptibles d'influer de façon similaire sur le calcul des tuyaux dont elles constituent l'environnement ;

- leur état (taux de consolidation, présence de vides...) qui imposera dans certains cas une injection du sol au préalable ;
- la présence éventuelle d'une nappe phréatique, la connaissance notamment de ses variations.

Les différents types de sol sont rappelés dans le *tableau II*.

Les caractéristiques mécaniques de l'environnement immédiat de la canalisation seront celles du sol en place au niveau du fil d'eau.

L'environnement immédiat du nouveau tuyau est constitué par :

- la canalisation existante ;
- le coulis de blocage dans le cas d'un tubage ;
- le lit de pose et le remblai d'enrobage de la canalisation existante ;
- le sol en place proprement dit.

Note : si un des risques géotechniques est noté fort, une étude complémentaire est recommandée.

2.7. Aspect hydraulique

Il convient de vérifier que l'ouvrage réhabilité répond aux exigences des conditions de fonctionnement hydraulique du réseau.

Pour ce faire, le débit théorique de l'ouvrage réhabilité est calculé conformément aux prescriptions générales de la norme NF EN 752⁴.

Il doit être tenu compte des modifications de l'ouvrage existant :

- diminution de la section d'écoulement ;
- diminution éventuelle de la rugosité ;
- diminution ou suppression éventuelle des variations de sections et des obstacles ;
- diminution ou suppression éventuelle des remous et décalage au droit des assemblages ;
- rétablissement éventuel d'une pente d'écoulement, etc.

⁴ L'instruction technique relative aux réseaux d'assainissement des agglomérations prescrite par la circulaire interministérielle n° 77.824/INT du 22 juin 1977 permet de compléter les prescriptions générales de la norme NF EN 752. L'instruction technique du 22 juin 1977 fait l'objet de travaux au sein de l'Astee en vue de son remplacement.

3. Justification de la tenue mécanique de l'ouvrage réhabilité

3.1. Principaux paramètres utilisés dans la méthode de calcul

3.1.1. Paramètres relatifs à la canalisation existante

3.1.1.1. Paramètres géométriques

Dans le cas des conduites circulaires, on considère les paramètres suivants :

- le diamètre maximal D_{\max} ;
- le diamètre minimal D_{\min} ;
- l'ovalisation initiale Ov_0 .

L'ovalisation se définit de la manière suivante :

$$Ov_0 = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}}$$

3.1.1.2. Défauts de forme – imperfections

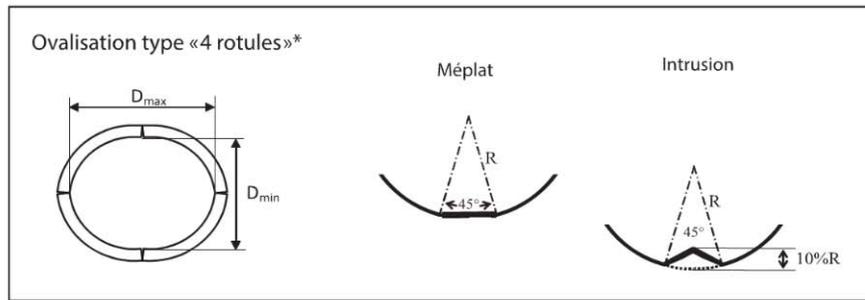
Le diagnostic de la canalisation permet de définir le profil transversal le plus défavorable compte tenu des variations sur toute la longueur où le même type de chemisage/tubage sera utilisé.

Le niveau d'importance des défauts à prendre en compte est celui constaté après les travaux préparatoires.

Les trous ou les intrusions de corps étrangers doivent être préalablement traités.

La méthode de calcul appliquée au chemisage prend en compte les imperfections suivantes qui ont une incidence importante sur la résistance au flambement (*figure 2*) :

- ovalisation inférieure à 10 % (cette valeur correspond aussi à la valeur maximale admissible à long terme après réhabilitation) ;
- méplat jusqu'à 45° d'extension angulaire. Le méplat est une imperfection locale qui se rencontre fréquemment en radier et peut être dû à un dépôt solidifié, à un écrasement localisé ou éventuellement à un défaut d'origine. Il se caractérise par la longueur de la partie droite ou plutôt par son extension angulaire ;
- intrusion jusqu'à 10 % du rayon. L'intrusion est caractérisée par son extension angulaire et son amplitude maximale. L'intrusion est une imperfection locale qui peut être due, par exemple, à un dépôt solidifié, à une fissure ouverte avec rejet ou éclat, à un poinçonnement.



*Tuyau d'accueil fissuré/ovalisé : à titre d'exemple, déformation due au mécanisme à quatre charnières plastiques correspondant aux quatre fissures longitudinales.

Figure 2. Ovalisations et imperfections de la canalisation existante

Note : le traitement de l'ovalisation à quatre rotules inclut déjà un effet limité d'intrusion.

La distribution des défauts dans le sens longitudinal est supposée constante, ce qui est la configuration la plus défavorable. Dans la réalité, les défauts ont une extension longitudinale limitée et il convient de ne prendre en compte que les défauts qui s'étendent sur plus de deux diamètres.

D'autres défauts localisés comme les décalages ont, en général, peu d'influence sur la résistance au flambement, mais leur importance peut affecter la mise en œuvre ou créer un défaut du chemisage (plis, décollements), voire affecter l'exploitation ou les performances hydrauliques du réseau réhabilité.

3.1.2. Paramètres relatifs à la réhabilitation (chemisage ou tubage)

De façon générale, les grandeurs nécessaires au dimensionnement seront communiquées par les fournisseurs comme « valeurs déclarées » assorties de justifications sur leur élaboration. Ces valeurs fondées sur la connaissance que le fournisseur a de ses produits sont en principe des valeurs caractéristiques. On considère les paramètres suivants : chemisages circulaires ou non, tubages circulaires, tubages non circulaires, parois structurées.

3.1.2.1. Cas des chemisages circulaires ou non

- L'épaisseur de dimensionnement : e
- Le module en flexion garanti à court terme : $E_{0,k}$
- Le module de flexion à long terme E_x garanti à 50 ans : $E_{50,k}$
- Le coefficient de Poisson : ν
- La contrainte de flexion garantie : $\sigma_{fb,k}$
- L'allongement de flexion garanti : $\epsilon_{fb,k}$
- La contrainte de flexion à long terme : $\sigma_{fb,L,k}$

L'allongement de flexion à long terme : $\epsilon_{fb,L,k}$

L'allongement limite à long terme en milieu acide : ϵ_{LT}

Pour certains matériaux, il existe des déformations limites à ne pas dépasser pour des questions de durabilité (risque de fissuration, défaillance due à l'attaque chimique sous déformation).

On définit le rapport moyen ϕ de la résistance à long terme avec la valeur caractéristique à court terme. À défaut de valeur justifiée, on prendra $\phi = 0,5$.

3.1.2.2. Cas des tubages circulaires

Caractéristiques géométriques :

- le diamètre intérieur ou extérieur : d_i ou d_e
- l'épaisseur nominale : e_n
- la déformation initiale : δ_0

La rigidité annulaire à court terme : S_0 ou module en flexion à court terme : E_0

Le taux de fluage calculé à 50 ans : α_{50} ou module de flexion à long terme E_x calculé à 50 ans : E_{50}

La rigidité annulaire à long terme : S_{50}

Le coefficient de Poisson : ν

La contrainte garantie : $\sigma_{fb,k}$

3.1.2.3. Cas des tubages non circulaires

Caractéristiques géométriques : épaisseur de dimensionnement : e

Module en flexion à court terme : E_0

Taux de fluage calculé à 50 ans : α_{50} ou module de flexion à long terme E_x calculé à 50 ans : E_{50}

Coefficient de Poisson : ν

Contrainte garantie : $\sigma_{fb,k}$

Dans le cas d'un tubage faisant appel à des produits cylindriques normalisés (PVC, plastiques renforcés de verre PRV...), on prendra $S_0 = SN$, où SN représente la classe de rigidité des tuyaux utilisés. Les valeurs de SN sont données par les normes de produits ou les avis techniques.

3.1.2.4. Cas des parois structurées

Selon la complexité du profil :

La rigidité de flexion transversale : EI

La rigidité axiale : EA

L'inertie de flexion de la paroi par m de longueur : I

La section transversale par m de longueur : A

L'épaisseur totale de la paroi : e

La distance de l'axe neutre à l'extrados : v

La distance de l'axe neutre à l'intrados : v'

Le coefficient d'amplification de contrainte : C_{σ}

Dans le cas des parois structurées, l'épaisseur de calcul est égale à la hauteur totale du profil. Le diamètre de calcul est mesuré au niveau de la fibre neutre du profil.

Le coefficient d'amplification de contrainte est égal au rapport entre la contrainte maximale de flexion calculée avec la géométrie réelle du profil et celle calculée sur un profil plein qui aurait le même diamètre de calcul et la même épaisseur. Dans le cas des parois structurées complexes comportant plusieurs matériaux, on doit calculer un coefficient d'amplification pour chaque matériau à vérifier.

3.1.3. Paramètres relatifs à l'environnement et au mode de réhabilitation

Ces paramètres sont déterminés sur la base des données géotechniques propres à l'environnement de l'ouvrage existant et du mode de réalisation des travaux de réhabilitation.

On considère les paramètres suivants :

- le poids volumique pris égal à 20 kN/m³ en l'absence d'indication contraire (dans le cas où le niveau de la nappe phréatique est connu de façon certaine, on peut déjauger les terres situées sous la nappe et prendre $\gamma = 10$ kN/m³) ;

- le module d'élasticité de l'environnement immédiat E_E (MPa) (tableau III) ;

- le coefficient de Poisson ν_E de l'environnement immédiat pris égal à 0,3 en l'absence d'indication contraire ;

- le coefficient de pression horizontale k_2 , à l'interface tuyau/enrobage, égal en un point donné au rapport des contraintes normales agissant respectivement sur un plan vertical et sur un plan horizontal au point considéré ;

Les caractéristiques mécaniques de l'environnement immédiat se confondent avec celles du sol en place. En fonction des types de sol, le *tableau III* propose des valeurs de E_E et k_2 .

Il est également possible de déterminer le module du sol en place à partir d'un essai *in situ*, l'essai pressiométrique étant particulièrement indiqué, ou par vérinage interne de la conduite [THEPOT, 2001b]. Dans le cas général, les valeurs hautes sont retenues. Dans le cas où la présence d'une nappe phréatique est identifiée, pour les sols G3 et G4, les valeurs basses seront retenues.

En cas de dégradations subies par l'environnement immédiat par infiltration ou exfiltration ou en présence de nappe pour les sols G3 et G4, des valeurs inférieures de E_E peuvent être retenues, dans la limite des fourchettes indiquées. Ces valeurs ne tiennent pas compte d'une éventuelle reconsolidation du sol environnant après réhabilitation.

Dans le cas des groupes de sol G3 et G4, lorsque le risque de perturbation de l'état d'équilibre du sol en place, dû à des travaux ultérieurs exécutés au voisinage immédiat de la canalisation à réhabiliter, est faible (ce qui est généralement le cas lorsque la couverture est supérieure à 2 mètres), on retient la valeur supérieure de k_2 . Sinon, il convient de retenir une valeur inférieure de k_2 , dans la limite des fourchettes données, pour les vérifications à terme vis-à-vis de l'état limite de service (ELS) et de l'état limite ultime (ELU). Toutefois, pour la vérification au flambement général, il convient de considérer la valeur supérieure de k_2 .

Note : les sols de type G5, interdits pour l'enrobage des canalisations dans le Fascicule 70, ne devraient pas constituer l'environnement immédiat de la canalisation. La présence avérée de ces sols nécessite des

| Groupe de sol | E_E Module du sol (MPa) | k_2 |
|---------------|---------------------------|-----------|
| G1 | 5 à 10 | 0,3 à 0,5 |
| G2 | 3 à 7 | 0,3 à 0,5 |
| G3 | 2,5 à 4,5 | 0,2 à 0,4 |
| G4 | 1,5 à 3 | 0 à 0,2 |
| G5 | Non applicable | |

Tableau III. Paramètres caractéristiques du sol

investigations complémentaires pour apprécier les risques (retrait/gonflement, tassement...) vis-à-vis de la canalisation réhabilitée. La prise en compte de ce type de sol doit être justifiée et ne doit pas résulter d'une approche sécuritaire, conséquence de la méconnaissance de l'environnement géotechnique.

Le remplissage par injection de coulis de l'espace annulaire d'un tubage permet de transférer les charges de la canalisation d'accueil au nouveau tuyau. La résistance minimale à la compression du coulis doit être de 3 MPa.

Dans l'état III, la canalisation existante n'est pas prise en compte dans le calcul du nouveau tuyau si ce n'est par l'assise qu'elle confère à la nouvelle canalisation. On suppose qu'elle transmet l'intégralité des charges au nouveau tuyau qui se comporte comme s'il était posé dans les sols constituant l'environnement immédiat de l'ouvrage existant.

3.2. Détermination des actions

Les actions sont les forces ou les pressions dues aux charges appliquées (permanentes, d'exploitation...) et les déformations imposées.

Les actions à considérer sont :

- la pression hydrostatique extérieure due à la présence de la nappe p_{we} ;
- la pression verticale des terres due aux remblais p_r ;
- la pression verticale due aux charges d'exploitation roulantes p_{er} , ou permanentes p_{ep} ;
- la pression horizontale des terres ;
- la pression hydrostatique extérieure temporaire due à l'injection du coulis de blocage dans le cas d'un tubage p_{inj} .

Note : on ne considère pas dans les calculs suivants les actions spécifiques résultant par exemple :

- de discontinuités longitudinales de l'assise (conditions d'appui aléatoires) ;
- de conditions de pose qui se traduisent par des flexions longitudinales dans les canalisation ;
- des conditions d'exploitation (dilatations dues aux variations de température des effluents, par exemple).

3.2.1. Pression hydrostatique extérieure p_{we} générée par la nappe

Dans le cas où la canalisation est posée sous le niveau de la nappe, elle se trouve soumise à une pression

hydrostatique extérieure p_{we} que l'on considère comme uniforme et égale à celle qui s'exerce au niveau de la cunette du nouveau tuyau (figure 3) :

$$p_{we} = \gamma_w \cdot H_w$$

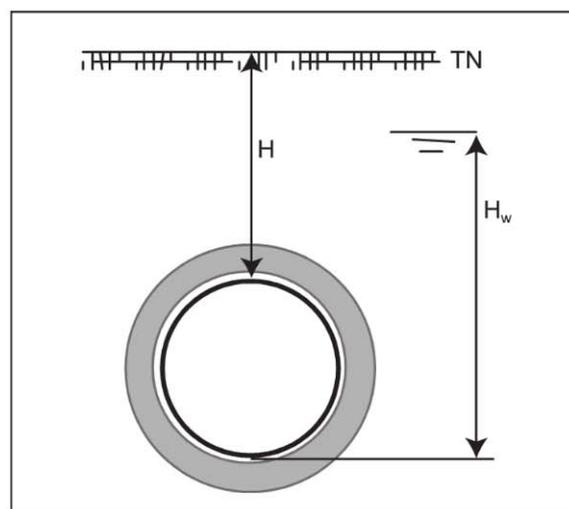
Avec le poids volumique de l'eau : $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$.

H_w correspond au plus haut niveau connu de la nappe phréatique par rapport au fil d'eau du nouveau tuyau, avec une valeur conventionnelle minimale de 0,5 m au-dessus de la génératrice supérieure de l'ouvrage ou 1,50 m par rapport au fil d'eau (on retiendra la plus grande des deux valeurs). Cette valeur couvre les effets d'une montée temporaire du niveau d'eau en fond de tranchée en cas d'orage. Dans certains cas, notamment lorsque l'ouvrage existant est enrobé au moyen d'un matériau drainant, le maître d'ouvrage peut imposer une valeur supérieure (jusqu'au terrain naturel).

Cette valeur est prise en compte pour la vérification du flambement à long terme.

La prise en compte d'événement exceptionnel (inondation) doit faire l'objet d'une vérification spécifique vis-à-vis du risque de flambement sur la base des caractéristiques mécaniques du matériau, d'un niveau de nappe pris au terrain naturel TN et de la durée de l'événement.

Une approche spécifique doit alors être menée en concertation avec le fournisseur (ou son représentant) et le maître d'ouvrage.



TN : terrain naturel.

Figure 3. Valeurs des cotes H et H_w sur chemisage ou tubage

3.2.2. Pression verticale des terres pr

On admet que :

- la pression du remblai pr est verticale et uniformément répartie sur le diamètre extérieur du nouveau tuyau ;
- la réaction d'appui est verticale et uniformément répartie selon un arc d'appui de 180 degrés.

La pression verticale pr est égale à la pression due au prisme de terre situé au-dessus de la génératrice supérieure du tuyau, pondérée par un coefficient de concentration C :

$$pr = C \cdot \gamma \cdot Hs$$

avec :

C : dépend en particulier du comportement du nouveau tuyau dans son environnement; les systèmes de réhabilitation conduisant à mettre en œuvre les produits flexibles, on prend $C = 1$;

γ : poids volumique du remblai (kN/m^3) déjaugé ou non;

Hs : hauteur de calcul de la charge de terrain au-dessus du tuyau existant définie suivant la valeur de la hauteur de couverture H;

Si $H \leq 5 \text{ m}$: $Hs = H$.

Si $H > 5 \text{ m}$: dans le cas général, Hs est évaluée à partir du modèle de K. TERZAGHI, minorée à 5 m, avec un coefficient de pression horizontale du sol k_2 égal à 0,3 et un angle de frottement sur les plans verticaux δ égal à 10° .

Dans le cas de remblais autoroutiers ou ferroviaires, on prendra $Hs = H$.

$$Hs = \max \left\{ 5\text{m}; \frac{D_e}{2 \cdot k_2 \cdot \tan(\delta)} \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot k_2 \cdot \tan(\delta) \cdot H}{D_e}} \right) \right\}$$

où D_e est le diamètre extérieur du tuyau existant exprimé en mètres.

3.2.3. Pression verticale per due aux charges roulantes

3.2.3.1. Charges routières sur la base des Eurocodes

On utilise les charges routières telles que définies dans la norme NF EN 1991-2 et son annexe nationale (Eurocode 1-2), notamment le modèle de charge n° 1, noté LM1 et le modèle de charge n° 2, noté LM2.

• Modèle de charge LM1

Le modèle de charge n° 1, noté LM1, comporte des charges concentrées (système d'essieux doubles noté TS) et des charges réparties (notées UDL). Pour l'application de ce modèle, la chaussée est divisée en un nombre entier de voies « conventionnelles » de 3 m de largeur. La voie désignée n° 1 reçoit le tandem le plus lourd (figure 4).

Les charges de base de l'Eurocode 1-2 sont des valeurs caractéristiques qui comprennent les effets dynamiques (tableau IV).

• Coefficients d'ajustement des charges

Les charges de base Q_{ik} sont multipliées par des coefficients d'ajustement α_Q qui dépendent de la classe et du type de trafic (ce coefficient varie entre 0,8 et 1) (tableau V).

Note : le système BC tel que défini dans le fascicule 61 titre II est couvert par le modèle de charge LM1.

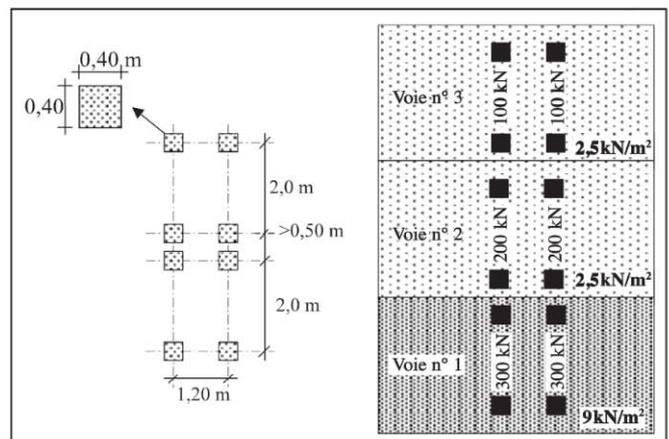


Figure 4. Modèle de charge LM1, principe de chargement des voies

| Emplacement | Tandem | Système UDL |
|------------------------------|--------------------------------|--|
| | Charges d'essieu Q_{ik} (kN) | q_{ik} (ou q_{rk}) (kN/m ²) |
| Voie n°1 | 300 | 9 |
| Voie n°2 | 200 | 2,5 |
| Voie n°3 | 100 | 2,5 |
| Autres voies | 0 | 2,5 |
| Aire résiduelle (q_{rk}) | 0 | 2,5 |

UDL : uniform distributed load (charges uniformément réparties)

Tableau IV. Valeurs de base du modèle LM1

| Classe de trafic | α_{Q1} | $\alpha_{Q2,3}$ | α_{q1} | $\alpha_{q2,3}$ |
|------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1,2 |
| 2 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 1 |

Classe 1 : trafic lourd élevé – trafic international (autoroutes) ; classe 2 : trafic courant – réseau routier national.

Tableau V. Coefficients d'ajustement des charges

• **Modèle de charge LM2**

Le modèle de charge n° 2 (figure 5), noté LM2, consiste en une charge d'essieu unique $\beta_Q Q_{ak}$ (kN), qu'il convient d'appliquer en un point quelconque de la chaussée, Q_{ak} étant égal à 400 kN, majoration dynamique comprise. Cependant, le cas échéant, il est possible de ne prendre en compte qu'une roue de $200 \beta_Q$ (kN).

Le coefficient β_Q est égal à 0,8 selon l'annexe nationale, ce qui donne une roue de 160 kN.

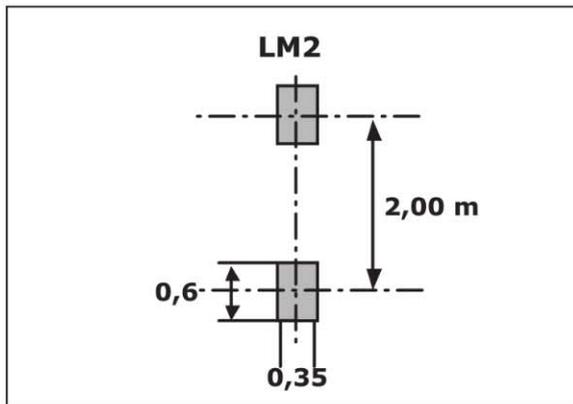


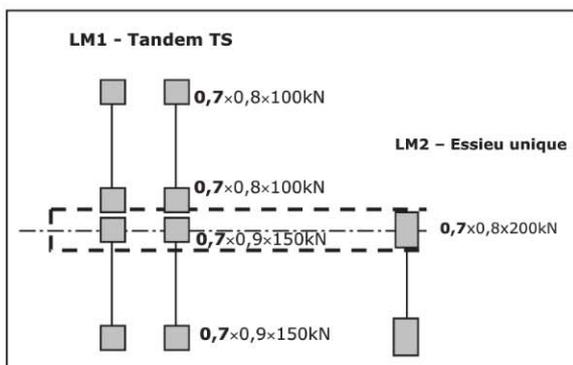
Figure 5. Charges de trafic. modèle de charge LM2

• **Réduction des charges routières sur remblai**

Les charges de tandem et les charges réparties sont réduites de 30 % pour tenir compte de la réduction des amplifications dynamiques par rapport aux charges sur un ouvrage d'art (AN EC1-2, 4.9.1, note 1).

• **Disposition des charges**

Dans le cas du modèle LM1, on dispose les deux roues du tandem le plus lourd à l'aplomb de la conduite (figure 6).



Note : les charges indiquées dans le schéma correspondent à des charges par roues.

Figure 6. Disposition des charges LM1 et LM2 au-dessus d'une canalisation et valeurs des charges à appliquer dans le cas d'une route à deux voies de classe de trafic 2

3.2.3.2. **Charges militaires**

On considère le convoi militaire Mc 120 du fascicule 61 titre II. Le poids total d'un véhicule Mc 120 est de 1 100 kN répartis uniformément sur deux chenilles (figure 7).

Les véhicules peuvent circuler en convoi ; dans le sens transversal, un seul convoi est supposé circuler, quelle que soit la largeur de la chaussée ; dans le sens longitudinal, la distance minimale entre deux véhicules est de 30,50 m. Les impacts des chenilles sont dirigés parallèlement à l'axe de celles-ci.

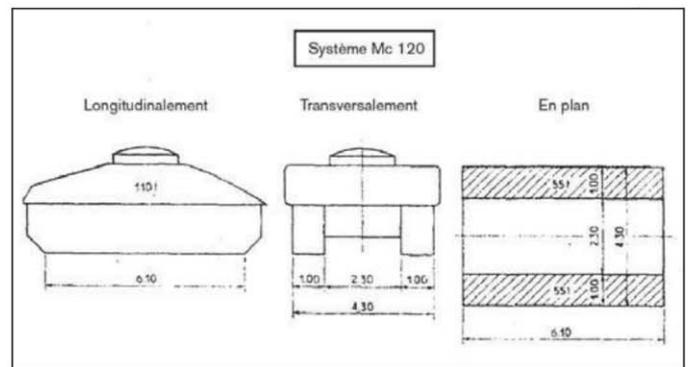


Figure 7. Charges militaires. Système Mc 120

On n'appliquera pas de coefficient d'amplification dynamique en cohérence avec les charges roulantes de l'Eurocode sur remblais.

3.2.3.3. **Charges ferroviaires**

Il existe quatre schémas de charge :

- LM71 ;
- SW0 ;
- SW2 ;
- train à vide.

Le modèle de charge LM71 représente l'effet statique d'un trafic ferroviaire normal. Il représente la charge verticale sur la voie. La disposition des charges et les valeurs caractéristiques des charges verticales sont celles de la figure 8.

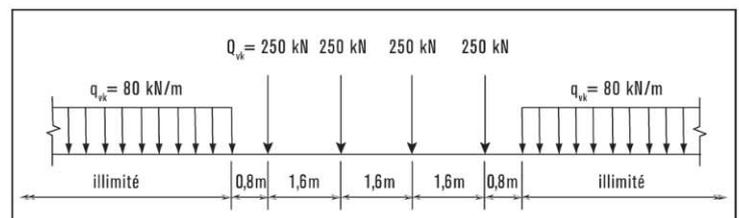


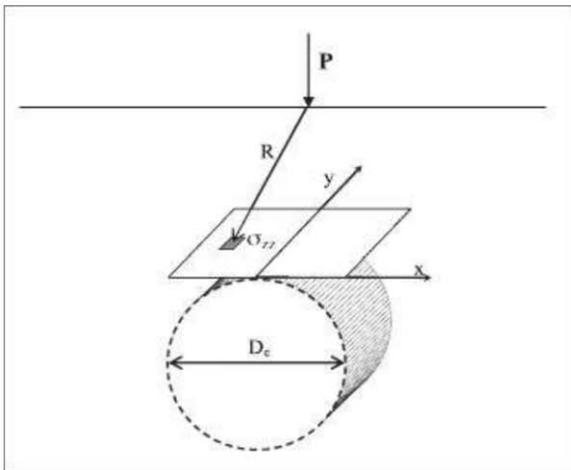
Figure 8. Charges ferroviaires. Modèle de charge LM71

Les modèles SW0 et SW2 représentent plutôt un fret. L'annexe nationale NF EN 1991-2/NA Clause 1.1(3) indique que, pour les murs de soutènement, les structures enterrées et les tunnels placés sous ou à côté des voies ferrées, il y a lieu de répartir uniformément les charges sur une largeur de 3,00 m à un niveau de 0,70 m sous la surface de roulement de la voie, aucun coefficient dynamique ni aucune majoration ne devant s'appliquer.

Cependant, la SNCF a des exigences nettement plus élevées que la norme européenne et il convient donc de se référer aux référentiels techniques relatifs aux ouvrages hydrauliques sous charges ferroviaires qui donnent les pressions à appliquer sur la génératrice supérieure de la canalisation.

3.2.3.4. Diffusion des charges sur la conduite réhabilitée

Les charges roulantes sont diffusées dans le remblai selon le modèle de Boussinesq (figure 9).



σ_{zz} : contrainte verticale.
Figure 9. Diffusion des charges sur la conduite réhabilitée

La contrainte verticale dans un massif de sol semi-infini à la profondeur z créée par une force verticale appliquée à la surface du massif est donnée en coordonnées cylindriques par l'expression suivante :

$$\sigma_{zz} = \frac{3 \cdot P \cdot z^3}{2\pi \cdot R^5}$$

Si la hauteur de couverture est supérieure à 0,5 m, la pression verticale p_{er} est considérée égale à la contrainte moyenne verticale calculée au niveau de la génératrice supérieure de la canalisation sur une largeur égale au diamètre extérieur et sur une longueur égale à 1 m.

Pour des hauteurs de couverture inférieures ou égales à 0,5 m, il y a lieu de prévoir des protections par des dispositions particulières.

Note : dans le cas d'une réhabilitation dimensionnée sur la base d'un état II, la hauteur de couverture à prendre en compte est prise à partir du niveau de la génératrice supérieure de la canalisation existante. Pour un état III, le niveau à prendre en compte est celui de la génératrice supérieure du produit mis en œuvre.

3.2.4. Pressions dues aux autres charges d'exploitation (p_{ep})

Les actions p_{ep} résultent de l'effet des charges permanentes au niveau du terrain naturel.

Elles s'exercent au niveau de la génératrice supérieure de la canalisation. Elles sont à déterminer en considérant le type de surcharges (ponctuelle, uniformément répartie...) et leur zone d'application et en tenant compte de la diffusion des charges dans le sol en fonction de la profondeur (on peut utiliser le modèle de Boussinesq).

3.2.5. Pression horizontale p_h des terres

La pression horizontale des terres p_h exercée sur la canalisation est considérée comme uniforme et prise égale à $k_2 \times p_r$ (figure 10).

k_2 : coefficient de pression horizontale des terres qui dépend de la nature de l'environnement immédiat et du type de réhabilitation dont les valeurs à prendre en compte sont indiquées au § 3.1.3.

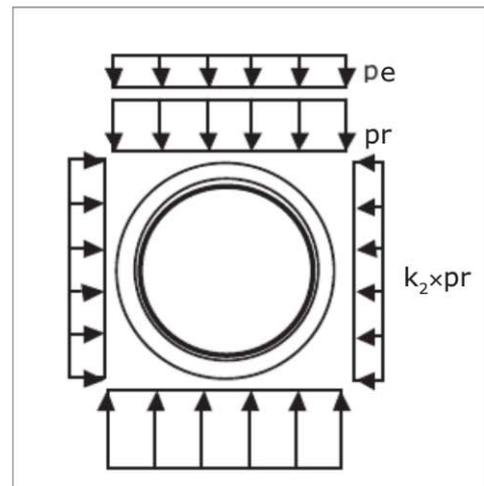


Figure 10. Pression exercée par le remblai et les charges d'exploitation

3.2.6. Pression extérieure p_{inj} ou p_{ext} temporaire due à l'injection du coulis de blocage dans le cas d'un tubage

Dans le cas d'un tubage avec injection de blocage, le nouveau tuyau se trouve soumis temporairement à une pression extérieure due à la colonne de coulis. On considère cette pression p_{inj} comme hydrostatique et uniforme et égale à celle qui s'exerce au niveau du fil d'eau.

Cas d'une injection de blocage à l'aide d'un coulis à base de ciment (figure 11) :

$$p_{inj} = \gamma_{coulis} \cdot H_{inj}$$

En l'absence d'information complémentaire, on prend comme poids volumique du coulis γ_{coulis} :

$$\gamma_{coulis} = 16 \text{ kN/m}^3$$

Pour compenser la pression extérieure p_{inj} et en limiter les effets, on peut établir et maintenir une pression d'eau intérieure p_{wi} dans le nouveau tuyau en veillant à la limiter à 0,1 MPa.

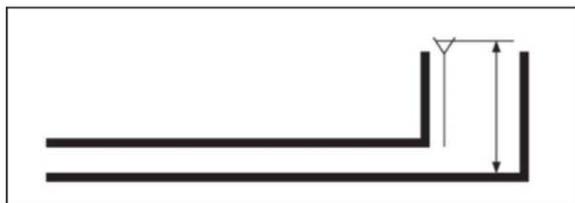


Figure 11. Pression due à l'injection du coulis de blocage

3.3. Vérification de la sécurité d'emploi

On distingue les états limites ultimes (ELU) et les états limites de service (ELS).

Les états limites ultimes correspondent à l'atteinte de la capacité portante et concernent de ce fait la résistance mécanique et/ou la stabilité au flambement.

Les états limites de service sont ceux dont le dépassement remet en cause les conditions de fonctionnement ou d'exploitation de l'ouvrage ou au terme de sa durée de vie, par exemple par déformation ou ovalisation excessives.

Le principe général de la sécurité est de faire en sorte que les états limites ne soient pas dépassés et ce, compte tenu des variations aléatoires affectant :

- les caractéristiques des matériaux définies par leurs valeurs caractéristiques ;
- les valeurs caractéristiques des actions et des sollicitations calculées.

3.3.1. Résistance de calcul

La résistance de calcul à court terme en flexion est définie comme

$$\sigma_{fb,d} = \sigma_{fb,k} / \gamma_M$$

où :

γ_M est le coefficient partiel relatif au matériau.

La résistance de calcul à long terme (50 ans) est une proportion ϕ de la résistance à court terme :

$$\sigma_{fb,L,d} = \phi \cdot \sigma_{fb,d}$$

ϕ est un coefficient de réduction tenant compte des effets à long terme sur la résistance en flexion.

À défaut de valeur justifiée, la valeur ϕ est fixée à 0,5, sauf pour les thermoplastiques où elle vaut 1,0.

3.3.2. Valeurs des coefficients partiels sur les actions

$\gamma_G = 1,35$ pour le poids du sol (pressions dues au poids du sol) ;

$\gamma_{G,we} = 1,35$ pour la pression hydrostatique de la nappe (niveau caractéristique ou niveau des « hautes eaux ») ;

$\gamma_{G,inj} = 1,5$ pour la pression d'injection du coulis ;

$\gamma_Q = 1,35$ pour les charges de trafic routier (voir Nota 2) ;

$\gamma_Q = 1,5$ pour les autres actions variables.

Nota 1 : Conformément à l'annexe nationale NF EN 1997/NA (AN 4.1 Dispositions générales) et à l'annexe nationale NF EN 1990/NA, les actions dues à l'eau sont traitées comme des actions permanentes, le caractère variable des actions dues à l'eau est pris en compte par l'intermédiaire des différentes situations de calcul.

Nota 2 : Conformément à la norme NF EN 1990/A1:2005, le coefficient d'action pour les charges dues au trafic routier est égal à 1,35.

3.3.3. Valeurs des coefficients de sécurité

3.3.3.1. Coefficients de sécurité matériau

Le coefficient γ_M tient compte de la probabilité acceptable d'avoir une résistance inférieure à la résistance caractéristique. Il dépend de chaque procédé et de l'expérience acquise.

On prendra les valeurs suivantes :

- tubages préfabriqués en usine : $\gamma_M = 1,2$;
- chemisages polymérisés en place : $\gamma_M = 1,5$.

3.3.3.2. Autres coefficients de sécurité

Coefficient de sécurité sur le module à long terme du matériau ou sur la rigidité annulaire à long terme ou sur la rigidité en flexion ou axiale à long terme, pour le calcul de stabilité au flambement :

$$\gamma_{ME} = 1,5.$$

3.3.4. Combinaisons d'actions

On note :

G : les actions permanentes défavorables autres que la nappe (p_r, p_{ep}) ;

G_w : l'action de la nappe (p_{we}) ;

Q_{Tr} : les actions dues au trafic (p_{cr}).

On considère pour les vérifications les trois combinaisons suivantes :

– combinaison ELU fondamental :

$$\gamma_G \times G + \gamma_{G,we} \times G_w + \gamma_Q \times Q_{Tr}$$

– combinaison ELS caractéristique :

$$G + G_w + Q_{Tr}$$

– combinaison ELS quasi permanent :

$$G + G_w + \Psi_2 Q_{Tr}$$

$\Psi_2 = 0$ pour les charges de trafic (Eurocodes NF EN 1990).

3.3.5. Situations de calcul

Pour l'évaluation des charges d'exploitation, on considère pour les situations de calcul les hauteurs minimale et maximale de couverture sur le linéaire à réhabiliter combinées avec la hauteur de nappe maximale.

3.3.6. États limites ultimes

Les états limites ultimes (ELU) suivants doivent être vérifiés :

- la stabilité au flambement à long terme ;
- la résistance (contrainte ou allongement).

3.3.6.1. Vérification de la stabilité au flambement

Pour chaque cas de flambement, on vérifie :

$$\frac{P_{x,d}}{P_{cr,x,d}} \leq 1$$

où $p_{x,d}$ est, selon le cas, la pression de calcul de la nappe, de la pression d'injection ou de la pression multiondes.

$p_{cr,x,d}$ est la pression critique de calcul de flambement associée à la pression p_x .

3.3.6.2. Vérification de la résistance mécanique

Cette vérification consiste à montrer que, sous l'effet des actions de calcul, les sollicitations qui en découlent ne dépassent pas les résistances de calcul.

• Vérification de la contrainte dans le cas d'un matériau homogène ou assimilé

On calcule la contrainte de calcul à partir du moment de calcul :

$$\sigma_{x,d} = \frac{6 \cdot M_{x,d}}{e^2}$$

et on vérifie :

$$\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} \leq 1$$

où $\sigma_{R,d}$ est la résistance de calcul, x : indice qui caractérise le moment fléchissant dans $M_{x,d}$.

• Cas des parois structurées

On calcule la contrainte de calcul à partir du moment de calcul :

$$\sigma_{x,d} = \frac{M_{x,d} \cdot v}{I} \quad (\text{on suppose } v > v')$$

On vérifie :

$$\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{R,d}} \leq 1$$

• Vérification de l'allongement dans le cas d'un matériau homogène ou assimilé

On calcule la déformation ultime de compression de la fibre externe :

$$\epsilon_{x,d} = \frac{\sigma_{x,d}}{E_{x,k}} (1 - \nu^2)$$

On vérifie :

$$\frac{\epsilon_{x,d}}{\epsilon_{R,d}} \leq 1$$

où $\epsilon_{R,d}$ est l'allongement résistant de calcul.

Une des deux vérifications précédentes est réalisée selon la nature du matériau. Les vérifications de résistances sont toujours faites à court terme et à long terme.

3.3.7. États limites de service

On effectue les vérifications suivantes (tableau VI) :

• **Ovalisation.** L'ovalisation totale O_v (ovalisation initiale + différée) à long terme admissible pour l'exploitation du réseau est de 10 %.

Pour certains matériaux, on devra également vérifier l'ovalisation à court et/ou à long terme.

• **Allongement (déformation)** en milieu acide à long terme pour les produits renforcés de verre et non

| Matériau | État limite ultime (ELU) | | | État limite de service (ELS) | | |
|------------------|--|------------------|--------------------|------------------------------|----------------|-----------------------------|
| | Résistance (contrainte ou allongement) | | Stabilité de forme | Ovalisation | | Allongement en milieu acide |
| | Court terme | Long terme | Long terme | Court terme ¹ | ELS Long terme | ELS Long terme |
| Thermoplastiques | Oui | Oui ² | Oui | Non | Oui | Non |
| Composites verre | Oui | Oui ³ | Oui | Non | Oui | Oui |
| Feutre | Oui | Oui ³ | Oui | Non | Oui | Non |

¹ En réhabilitation par chemisage (ou tubage sans espace annulaire), l'ovalisation à court terme est considérée égale à celle du tuyau d'accueil.
² Pour les thermoplastiques, la vérification est réalisée sur la base de la résistance à court terme.
³ En réhabilitation par chemisage, la vérification sera réalisée sur la base d'une contrainte admissible à long terme égale à 50 % de la valeur à court terme en l'absence de données du fournisseur.

Tableau VI. Vérifications à effectuer en fonction de la nature des matériaux

protégés du contact de l'eau. Pour les produits renforcés de verre et non protégés du contact de l'eau, on est amené à vérifier que les allongements calculés en combinaison quasi permanente restent limités aux valeurs admissibles.

Pour les tubages par enroulement hélicoïdal, les vérifications ne portent que sur la stabilité de forme et l'ovalisation.

3.4. Vérification de la sécurité d'emploi pour les cas de charge particuliers

Voies ferrées : il conviendra de se référer aux référentiels techniques de la SNCF traitant des ouvrages hydrauliques sous charges ferroviaires.

Partie 1. Cas des sections circulaires

4. Justification des tubages sous la pression d'injection du coulis

La stabilité mécanique d'un tubage doit bien évidemment être assurée en phase de montage, en particulier lors des injections de coulis destinées à rétablir une continuité mécanique entre celles-ci et l'ouvrage existant. Un tubage circulaire libre, même bloqué en clé, est extrêmement déformable quand il est soumis à la pression d'injection du coulis. C'est probablement pendant cette phase que le tubage subit le niveau de contraintes le plus élevé de toute son existence.

La pression de calcul est hydrostatique, sa valeur maximale est $p_{inj} = H_{inj} \cdot \gamma_c$, où γ_c est le poids volumique du coulis et H_{inj} la hauteur maximale d'injection mesurée par rapport au fil d'eau.

Les formules suivantes ont été établies pour un tubage libre simplement appuyé en clé. L'appui de clé doit être continu ou la distance entre deux appuis successifs doit être inférieure à trois diamètres du tubage.

La pression critique de flambement du tubage est égale à :

$$P_{cr,inj} = 24 \cdot S_{50}$$

avec : S_{50} la rigidité annulaire à long terme.

Valeur de calcul :

$$P_{cr,inj,d} = 24 \cdot S_{50,d}$$

$$S_{50,d} = \frac{S_{50}}{\gamma_{ME}}$$

Le gradient de pression verticale provoque la diminution du diamètre vertical du tubage et l'augmentation du diamètre horizontal (figure 12).

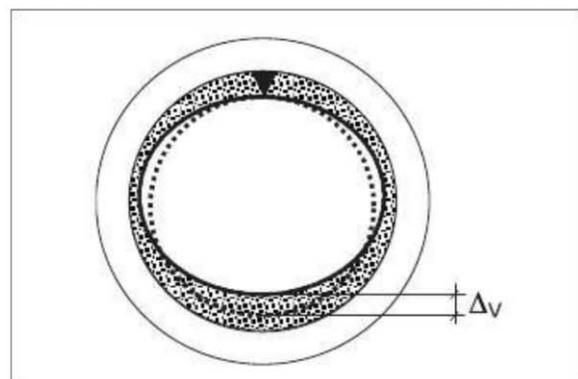


Figure 12. Ovalisation sous l'action de la pression verticale

4.1. Cas d'un tubage vide

La flèche verticale est donnée par :

$$\Delta d_v = \Gamma_{cr} \cdot \gamma_c \cdot \frac{d_e^2}{256 \cdot S_{50}} (\pi^2 - 8) + \Gamma_{cr} \cdot 2e_0$$

où :

γ_c est le poids volumique du coulis ;

d_e est le diamètre extérieur du tubage ;

e_0 est le défaut initial de forme.

Γ_{cr} est le facteur d'amplification des déplacements, donné par :

$$\Gamma_{cr} = \frac{1}{1 - \frac{P_{inj}}{P_{cr,inj}}}$$

4.2. Cas d'un tubage rempli d'eau

Si le tubage est rempli d'eau préalablement à l'injection du coulis, la flèche verticale est donnée par :

$$\Delta d_v = \Gamma_{cr} \cdot \frac{(\gamma_c \cdot d_e^2 - \gamma_w \cdot d_i^2)}{256 \cdot S_{50}} (\pi^2 - 8) + \Gamma_{cr} \cdot 2e_0$$

où :

γ_w est le poids volumique de l'eau

d_i est le diamètre intérieur du tubage

$p_w = H_w \cdot \gamma_w$ est la pression de l'eau de remplissage mesurée au niveau du fil d'eau.

$$\Gamma_{cr} = \frac{1}{1 - \frac{\text{Max}(P_{inj} - P_w)}{P_{cr,inj}}}$$

Nota : si $p_w > p_{inj}$, Γ_{cr} est inférieur à 1.

L'ovalisation après injection est donnée par :

$$ov_{inj} = \frac{d_v}{d_e}$$

Remarque : dans le cas des tubages de grand diamètre, il est conseillé de bloquer le tubage au niveau du diamètre horizontal et de réaliser les injections en plusieurs phases. Dans ce cas, l'ovalisation est beaucoup plus faible.

4.3. Vérifications à effectuer

– ELU : stabilité au flambement

On vérifie que la pression d'injection de calcul $p_{inj,d}$ est inférieure à la pression critique de calcul $p_{cr,inj,d}$:

$$\frac{P_{inj,d}}{P_{cr,inj,d}} \leq 1$$

– ELS : ovalisation après injection

$$ov_{inj} \leq 3 \%$$

On vérifie que l'ovalisation après injection est inférieure à 3 %.

5. Justification des chemisages et tubages circulaires sous l'action de la nappe

5.1. Modèle de calcul

Le modèle de calcul est basé sur une méthode analytique de calcul au flambement d'un chemisage/tubage mince plaqué sur un support, qui a été développée initialement dans le cadre du programme national Rerau.

Le modèle de calcul prend en compte les effets géométriques du second ordre, le contact variable entre le chemisage/tubage et le support, la géométrie exacte du profil ainsi que les différentes imperfections.

On admet que la nappe peut s'infiltrer à l'interface entre le tubage ou le chemisage et le support et que l'eau est en équilibre hydrostatique. On néglige l'effet des gradients hydrauliques. Le chemisage/tubage résiste donc seul à l'action de la nappe.

Le tubage ou le chemisage est plaqué sur le support. Dans le cas des tubages, cette condition est réalisée par l'injection. Dans le cas des chemisages, le vide annulaire résiduel sera considéré comme une imperfection géométrique, sans remettre en cause l'hypothèse « plaqué ». Dans tous les cas, on néglige totalement l'adhérence à l'interface chemisage/ouvrage ou tubage/coulis. Le glissement et le décollement sont donc libres.

Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- on ne s'intéresse qu'au comportement transversal et on néglige la flexion longitudinale. On ne considère que les actions transversales sur une « tranche de longueur unité » se déformant dans son plan ;
- l'action de la nappe est en principe considérée comme permanente. Le fluage est pris en compte par le biais de rigidités (de flexion et de compression) différées ;
- les imperfections de forme sont prises en compte dans les calculs à l'aide de coefficients de réduction ou d'amplification.

5.2. Profil de calcul et profil idéalisé

5.2.1. Profil de calcul

Le profil de calcul se définit par le profil du chemisage/tubage (rayons de courbures, angles, périmètre moyen) et son épaisseur.

5.2.1.1. Cas des tubages

Le profil de calcul est le profil spécifié au fournisseur par le bureau d'études ou l'entreprise.

L'épaisseur de calcul est l'épaisseur nominale déclarée par le fournisseur.

5.2.1.2. Cas des chemisages

Le profil de calcul est le profil le plus défavorable de la section d'ouvrage où le même type de chemisage sera utilisé (même épaisseur), dont on définit une valeur moyenne sur une longueur maximale de $3d_{eq}$ (d_{eq} = diamètre équivalent du cercle de même périmètre).

Le défaut est négligé si sa longueur est inférieure à cette valeur.

Le diagnostic de l'ouvrage, complété par l'expérience et/ou des hypothèses *a priori*, permet de définir le profil le plus défavorable (au point de vue des courbures), compte tenu des variations de profil sur toute la longueur où le même type de chemisage sera utilisé. À partir de ce profil de calcul, le bureau d'études calcule l'épaisseur spécifiée.

L'épaisseur de calcul est l'épaisseur « minimale moyenne » déclarée par le fournisseur, réputée caractéristique.

5.2.2. Profil idéalisé

Le profil de calcul est transformé en un profil idéalisé qui est un profil géométrique plus simple de forme convexe composé d'arcs et de droites tangentes à leurs points de contact. Les imperfections sont les déviations par rapport au profil idéalisé (figure 13).

Les formules de calcul (pression critique de flambement, sollicitations) s'appliquent aux profils idéalisés. Les imperfections sont prises en compte à l'aide de facteurs de correction qui s'appliquent aux formules de calcul.

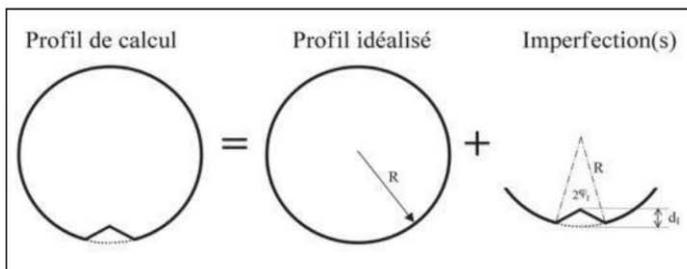


Figure 13. Profil de calcul

5.3. Imperfections de forme

Les imperfections géométriques ont une incidence importante sur la résistance des chemisages à la pression hydrostatique externe et il convient donc de leur apporter une attention particulière. L'imperfection est une variation par rapport à la forme idéalisée du chemisage. Les imperfections peuvent varier selon plusieurs modalités :

- fonction de forme ;
- distribution dans le sens longitudinal ;
- distribution dans le sens transversal ;
- amplitude.

Il n'est pas possible de prendre en compte simultanément tous ces paramètres et l'expérience conduit à ne retenir que quelques imperfections équivalentes dont les valeurs doivent permettre de couvrir l'ensemble des effets de toutes les imperfections particulières. Certaines imperfections sont dues aux matériaux utilisés ou aux conditions de mise en œuvre, d'autres sont dues à l'ouvrage existant. Les chemisages sont par nature sensibles aux variations de forme de l'ouvrage existant. En revanche, les tubages sont éventuellement sensibles aux déformations consécutives à l'injection du vide annulaire.

On distingue les imperfections globales distribuées sur l'ensemble du périmètre et les imperfections locales distribuées sur un secteur angulaire limité (figure 14). Dans tous les cas, la distribution des imperfections dans le sens longitudinal est supposée constante, ce qui est la configuration la plus défavorable. Dans la réalité les imperfections ont une extension longitudinale limitée et on convient donc de ne prendre en compte que les imperfections qui s'étendent sur plus de trois diamètres équivalents du produit de réhabilitation.

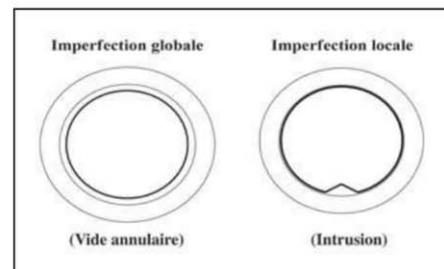


Figure 14. Imperfections de forme

5.3.1. Imperfections globales

Le vide annulaire résiduel est une imperfection globale qui est égale à la valeur moyenne sur le périmètre de la distance entre la face externe du chemisage et la paroi de l'existant à la fin de la mise en œuvre du chemisage. Il est noté g comme « gap » (vide en anglais). Le g a la dimension d'une longueur, mais on l'exprime plutôt comme un pourcentage du rayon r_{eq} (r_{eq} = rayon du cercle de même périmètre = $P/2\pi$).

Lovalisation est une imperfection globale par rapport à la forme circulaire (figure 15), elle correspond aussi au premier mode de déformation en flexion d'un anneau.

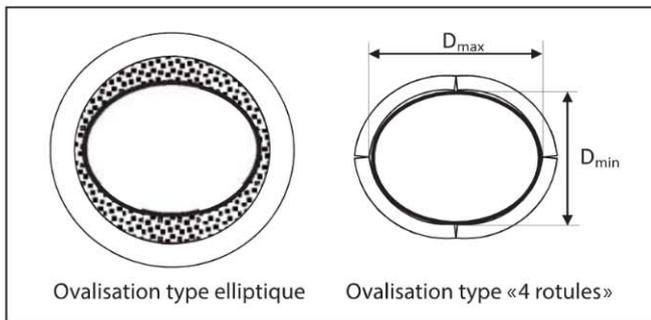


Figure 15. Types d'ovalisation

L'ovalisation se définit de la manière suivante (figure 15) :

$$OV_o = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}}$$

où D_{max} est le diamètre maximal qui n'est pas nécessairement horizontal et D_{min} est le diamètre minimal. Elle a deux origines très différentes selon le type de réhabilitation (tubage ou chemisage).

Dans le cas d'un tubage circulaire avec vide annulaire injecté, l'ovalisation est due à l'effet de la pression d'injection du coulis.

Dans le cas d'un chemisage, l'ovalisation est due à la forme de l'ouvrage existant.

5.3.2. Imperfections locales

Les imperfections locales ont par définition une extension angulaire limitée. On distingue trois types d'imperfections locales : le méplat, l'intrusion et l'augmentation locale du rayon de courbure (figure 16).

L'incidence des imperfections locales sur le comportement des chemisages-tubages peut dépendre de leur position contrairement aux imperfections globales.

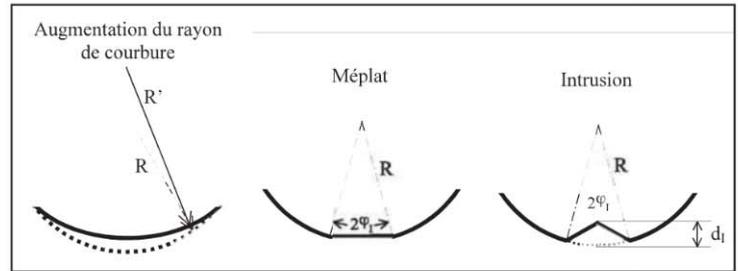


Figure 16. Imperfections locales

5.4. Valeurs des imperfections à prendre en compte (états d'accueil I ou II)

5.4.1. Vide annulaire

5.4.1.1. Cas des tubages

Pour les tubages avec vide annulaire injecté, on admet que le vide annulaire résiduel est nul ($g = 0$), en négligeant l'effet du retrait du coulis.

5.4.1.2. Cas des chemisages polymérisés en place

Le vide annulaire g est forfaitairement égal à 1 % du rayon équivalent. Cette valeur couvre les effets défavorables d'une imperfection de forme affine de la figure de flambement du chemisage.

Vide annulaire : $g = (1 \%) r_{eq}$

r_{eq} = rayon du cercle de même périmètre = $P/2\pi$

5.4.2. Ovalisation

Pour les tubages avec injection du vide annulaire, l'ovalisation de calcul est l'ovalisation après injection. Si l'état de la conduite d'accueil est de type I, l'ovalisation de calcul est égale à l'ovalisation initiale.

Si l'état de la conduite d'accueil est de type II (fissures longitudinales et voussoirs articulés), l'ovalisation initiale ne pourra pas être inférieure à 3 %.

5.5. Calcul de la pression critique de flambement

La pression critique de flambement sous l'action de la nappe d'un chemisage ou tubage circulaire $p_{cr,we}$ est donnée par la formule générale suivante [RERAU, 2000b] :

$$P_{cr,we} = 0,97 \cdot k^{0,4} \cdot \kappa_p \cdot \frac{EI_L^{0,6} \cdot EA_L^{0,4}}{r^{2,2}}$$

où :

EI_L : rigidité de flexion à long terme de la section transversale en déformation plane ;

EA_L : rigidité axiale à long terme de la section transversale en déformation plane ;

κ_p : facteur de réduction dû aux imperfections de forme :

$$\kappa_p = \kappa_{p,g} \cdot \kappa_{p,4r} \cdot \kappa_{p,el} \cdot \kappa_{p(\phi,w)}$$

$\kappa_{p,g}$: facteur de réduction de la pression critique dû au vide annulaire g ;

$\kappa_{p,4r}$: facteur de réduction de la pression critique dû à l'ovalisation de type à quatre rotules ;

$\kappa_{p,el}$: facteur de réduction de la pression critique dû à l'ovalisation de type elliptique ;

$\kappa_{p,(\varphi,w)}$: facteur de réduction de la pression critique dû à un méplat ou à une intrusion ;

k : nombre de lobes de flambement (1 ou 2), on prend $k = 1$.

Remarque : la formule de la pression critique a été établie dans l'hypothèse où on peut négliger les déplacements d'effort tranchant par rapport aux déplacements d'effort fléchissant. Elle est applicable aux tubages ou chemisage à parois structurées.

Cas d'un matériau homogène et d'une paroi structurée :

$$EI_L = \frac{E_{50,k} \cdot I}{1 - \nu^2} \quad EA_L = \frac{E_{50,k} \cdot A}{1 - \nu^2}$$

$$P_{cr,we} = 0,97 \cdot \kappa_p \cdot \frac{E_{50,k}}{1 - \nu^2} \cdot \frac{I^{0,6} \cdot A^{0,4}}{r^{2,2}}$$

où I est l'inertie de flexion et A l'aire de la section transversale par unité de longueur.

Cas d'un matériau homogène et d'une paroi pleine d'épaisseur e :

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

Autres expressions pour les tubages :

$$P_{cr,xe} = \kappa_p \cdot \beta_1 \cdot 8 \cdot S_{50}$$

Cas d'un matériau homogène et d'une paroi structurée :

$$\beta_1 = 0,97 \cdot \left(\frac{A \cdot r^2}{I}\right)^{0,4}$$

Cas d'un matériau homogène et d'une paroi pleine d'épaisseur e :

$$\beta_1 = 2,62 \cdot \left(\frac{r}{e}\right)^{0,8}$$

5.6. Calcul des facteurs de correction dus aux imperfections de forme

Plusieurs imperfections peuvent être présentes simultanément sur un même profil. On peut avoir, par exemple, pour un chemisage : un vide résiduel de 1 % (imperfection globale), une ovalisation de 3 % (imperfection globale) et un méplat en radier d'ouverture angulaire 15° (imperfection locale). Les imperfections sont prises en compte dans les calculs à l'aide de facteurs de correction qui s'appliquent aux quantités calculées (pression critique, déflexions, moments, etc.) sur la forme idéalisée du chemisage. La combi-

naison des imperfections est réalisée par la multiplication des facteurs de correction.

5.6.1. Vide annulaire

On calcule le vide annulaire réduit δ_g :

$$\delta_g = \frac{1}{k^{2/5}} \frac{2g}{R} \left[\frac{\pi}{2} \frac{EA}{EI} \frac{R^3}{P} \right]^{3/5}$$

Pour un matériau plein, homogène et isotrope d'épaisseur e :

$$\delta_g = 2,93 \cdot \frac{g}{r} \left(\frac{r}{e}\right)^{1,2}$$

Le facteur de réduction de la pression critique est donné par :

$$\kappa_{p,g} = \frac{1}{1 + 0,38 \cdot \delta_g}$$

Le facteur d'amplification de la flèche critique est donné par :

$$\kappa_{d,g} = 1 + 0,51 \cdot \delta_g$$

5.6.2. Ovalisation de type à quatre rotules (quatre voussoirs articulés)

Pour un matériau plein, homogène, isotrope d'épaisseur e :

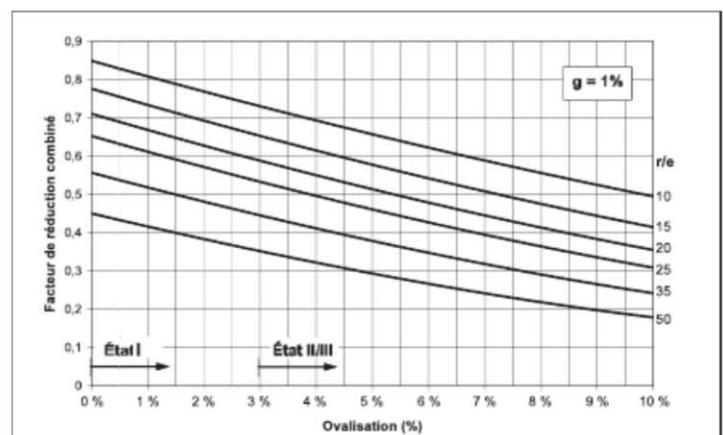
$$\kappa_{p,4r} = \frac{1}{1 + 3,23 \cdot \delta_{ov} + 21,2 \cdot \delta_{ov}^2}$$

où : $\delta_{ov} = 0,514 \cdot OV_o \cdot \left(\frac{r}{e}\right)^{0,4}$ (ovalisation réduite).

5.6.3. Vide annulaire + ovalisation à quatre rotules

$$\kappa_{p,gx4r} = \frac{1 - 4 \cdot \delta_{ov} + 4,9 \cdot \delta_{ov}^2}{1 + 0,38 \cdot \delta_g - 0,6 \cdot \delta_g \cdot \delta_{ov}}$$

Ce facteur de réduction combiné donne un résultat plus exact et légèrement plus favorable que la multiplication des deux facteurs simples (figure 17).



Note : les seuils d'ovalisation caractérisant les états d'accueil initiaux couvrent les cas courants.
Figure 17. Facteur de réduction combiné en fonction du rapport r/e et de l'ovalisation

5.6.4. Ovalisation elliptique (tubage)

$$\kappa_{p,el} = \left[\frac{1 - ov_{inj}}{(1 + ov_{inj})^2} \right]^{1,8}$$

5.6.5. Imperfections locales de type méplat ou intrusion

Remarque préliminaire : les expressions analytiques qui suivent ont été validées par comparaison avec des calculs aux éléments finis, elles ne sont valables que si l'extension angulaire 2φ est inférieure à 45° et si l'amplitude maximale relative (w/R) est inférieure à 10 %.

• **Méplat** (figures 18 et 19)

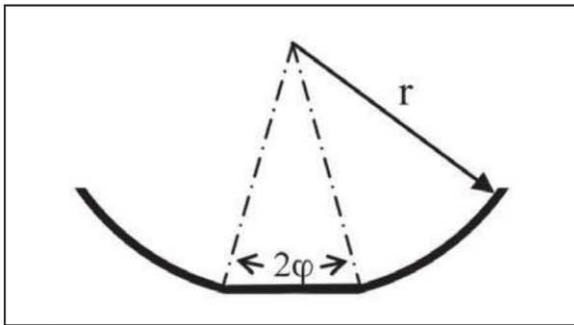


Figure 18. Méplat

$$\kappa_{p,\varphi} = -1,443 \cdot \delta_\varphi + 1,26 \text{ pour } 0,18 \leq \delta_\varphi \leq 0,7$$

$$\kappa_{p,\varphi} = 1 \text{ pour } \delta_\varphi < 0,18$$

$$\text{avec } \delta_\varphi = 0,447 \cdot \varphi \cdot \left(\frac{r}{e} \right)^{0,4}$$

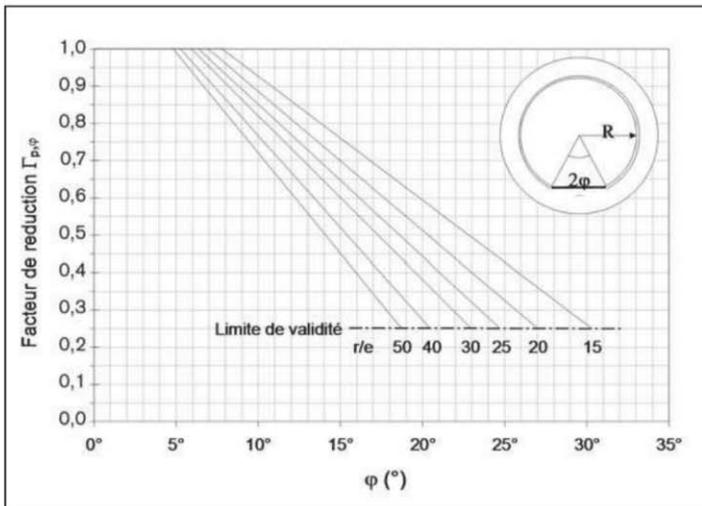


Figure 19. Facteur de réduction dû à un méplat en fonction du ratio r/e et φ

• **Intrusion** (figures 20 et 21)

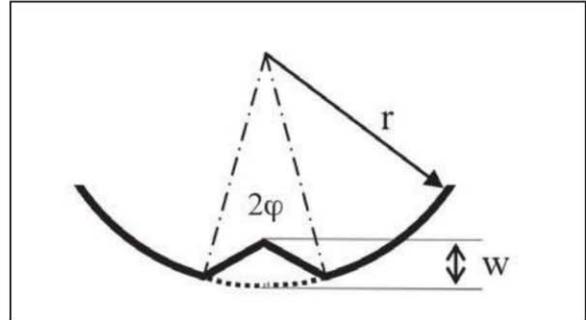


Figure 20. Intrusion

$$\kappa_{p,w} = \kappa_{p,\varphi} \cdot (1 - 3,9 \cdot \delta_w)$$

avec :

$$\delta_w = 0,447 \cdot \left(\frac{w}{r} - \frac{\varphi^2}{2} \right) \cdot \left(\frac{r}{e} \right)^{0,4}$$

si $\delta_w < 0$, on pose $\delta_w = 0$.

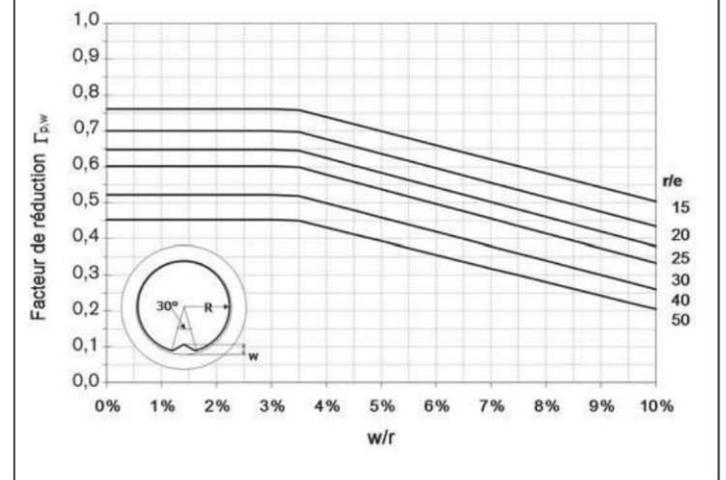
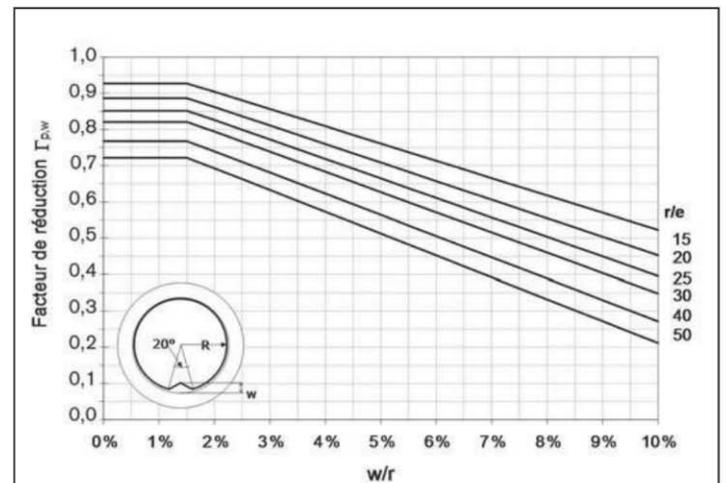


Figure 21. Facteur de réduction dû à une intrusion en fonction des ratios r/e et w/r

5.6.6. Chemisages ou tubages circulaires à parois structurées

Pour le calcul des seuls facteurs de réduction, on remplace (r/e) par

$$\sqrt{\frac{EA}{12 \cdot EI}} \cdot r$$

5.7. Calcul des contraintes ou allongements

À l'instant du flambement, les sollicitations prennent les valeurs critiques $M_{cr,we}$ pour le moment fléchissant et $N_{cr,we}$ pour l'effort normal. Le moment fléchissant critique est donné par :

$$M_{cr,we} = 1,2 \cdot \kappa_M \cdot \frac{EI_L}{r}$$

Où κ_M est le facteur d'amplification dû aux imperfections.

$\kappa_M = 1,1$ en général, sauf pour les imperfections locales de type méplat ou intrusion où $\kappa_M = 1,5$.

Pour un matériau plein, homogène, isotrope d'épaisseur e :

$$M_{cr,we} = 0,1 \cdot \kappa_M \cdot \frac{E_{50,k}}{1 - \nu^2} \cdot \frac{e^3}{r}$$

L'effort normal critique est donné par :

$$N_{cr,we} = 1,26 \cdot P_{cr,we} \cdot r$$

Le moment fléchissant maximal caractéristique par unité de longueur M_{we} est donné par l'expression suivante :

$$M_{we} = \frac{0,5 \cdot \left(\frac{P_{we}}{P_{cr,we}} \right) \cdot M_{cr,we}}{1 - 0,5 \cdot \left(\frac{P_{we}}{P_{cr,we}} \right)^2}$$

L'effort normal par unité de longueur en fonction de la pression de calcul est donné par :

$$N_{we} = P_{we} \cdot R_m$$

Nota 1 : le moment fléchissant varie de manière non linéaire avec la pression de la nappe, il est maximal à long terme.

Nota 2 : on ne tient pas compte de l'effort normal dans les vérifications de résistance.

Le moment maximal de calcul $M_{we,d}$ est donné par l'expression suivante :

$$M_{we,d} = \frac{0,5 \cdot \left(\frac{P_{we,d}}{P_{cr,we}} \right) \cdot M_{cr,we}}{1 - 0,5 \cdot \left(\frac{P_{we,d}}{P_{cr,we}} \right)^2}$$

où : $P_{we,d} = \gamma_{G,w} \cdot P_{we}$

Dans le cas d'un matériau plein et homogène d'épaisseur e :

$$\sigma_{we} = \frac{6 \cdot M_{we}}{e^2} \quad \epsilon_{we} = \frac{\sigma_{we}}{E_{50,k}} (1 - \nu^2)$$

$$\sigma_{we,d} = \frac{6 \cdot M_{we,d}}{e^2} \quad \epsilon_{we,d} = \frac{\sigma_{we,d}}{E_{50,k}} (1 - \nu^2)$$

Dans le cas d'un matériau homogène et d'une paroi structurée d'épaisseur e :

$$\sigma_{we} = C_{cs} \cdot \frac{6 \cdot M_{we}}{e^2} \quad \epsilon_{we} = \frac{\sigma_{we}}{E_{50,k}} (1 - \nu^2)$$

$$\sigma_{we,d} = C_{cs} \cdot \frac{6 \cdot M_{we,d}}{e^2} \quad \epsilon_{we,d} = \frac{\sigma_{we,d}}{E_{50,k}} (1 - \nu^2)$$

5.8. Vérifications à effectuer pour le dimensionnement de la réhabilitation

On effectue les vérifications suivantes :

- ELU :

– Contrainte ou allongement à long terme :

$$\sigma_{we,d} / \sigma_{fb,L,d} \leq 1 \quad \text{ou} \quad \frac{\epsilon_{we,d}}{\epsilon_{fb,L,d}} \leq 1$$

– Stabilité au flambement à long terme :

$$P_{we,d} / P_{cr,we,d} \leq 1 \quad \text{avec} \quad P_{cr,we,d} = \frac{P_{cr,we}}{\gamma_{ME}}$$

- ELS :

– Allongement à long terme pour certains produits (composite verre).

$$\epsilon_{we} \leq \epsilon_{LT}$$

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

L'état II concerne les canalisations qui présentent des fissures longitudinales (charnières ou rotules plastiques), mais dont la rigidité n'est pas négligeable en dehors des zones fissurées (exemple : canalisation en béton armé fissurée).

Ces canalisations ont un comportement plus ou moins flexible et sont susceptibles de se déformer en

imposant au chemisage des efforts et déformations localisées (figure 22).

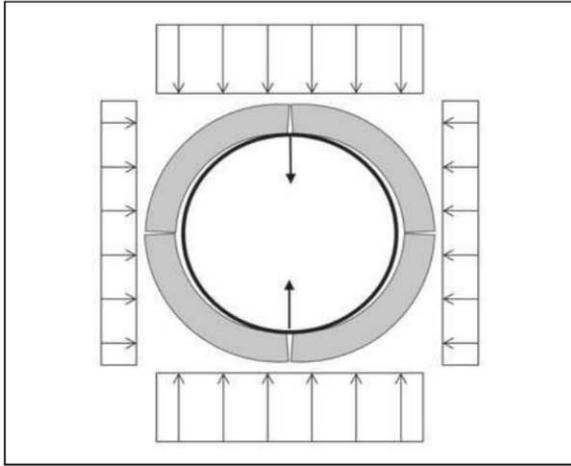


Figure 22. Pression exercée par le remblai, les charges d'exploitation et la nappe phréatique et ses effets

I.D. Moore a montré que le comportement mécanique complexe de l'ensemble sol-conduite fissurée-chemisage peut se modéliser en traitant indépendamment l'interaction entre la conduite fissurée et le sol, d'une part, et l'interaction entre la conduite fissurée et le chemisage, d'autre part.

Il a également montré les deux points suivants :

- le comportement d'une conduite fissurée enterrée est tout à fait similaire à celui d'une conduite souple et peut être modélisé avec les mêmes équations ;
- l'interaction entre une conduite fissurée et un chemisage se réduit à l'action de deux forces concentrées situées au niveau des fissures clé-radial, comme dans un essai d'écrasement diamétral.

Le couplage entre les deux modèles (interaction sol-conduite et conduite-chemisage) est assuré par l'ovalisation qui est le paramètre de sortie du premier modèle (le résultat du nouvel équilibre de la conduite fissurée) et le paramètre d'entrée du second modèle (le déplacement imposé au chemisage).

6.1. Calcul de l'ovalisation

L'ovalisation différée est calculée avec la solution analytique d'Einstein-Schwartz pour l'effet des charges géostatiques et la solution analytique de Hoeg pour l'effet des charges de surface (variables ou permanentes). Les expressions analytiques sont dérivées des deux solutions en négligeant la raideur en

flexion du chemisage/tubage. Par ailleurs, on utilise un module du sol en petites déformations pour l'effet des charges d'exploitation.

$$O_{V_{II,1}} = \beta_0 \cdot \frac{D_e}{D_i} \cdot [(1 - 2h/D_i) - (1 + h/D_i)k_2] \cdot \left[\lambda \cdot \frac{P_r}{E_E} \right]$$

(charges géostatiques)

$$O_{V_{II,2}} = \beta_1 \cdot [(1 - 2h/D_i)] \cdot \frac{D_e}{D_i} \cdot \left[\frac{P_{er}}{K_\mu \cdot E_E} \right]$$

(charges variables de trafic)

$$O_{V_{II,3}} = \beta_1 \cdot [(1 - 2h/D_i)] \cdot \frac{D_e}{D_i} \cdot \left[\frac{P_{ep}}{K_\mu \cdot E_E} \right]$$

(charges permanentes de surface)

où :

$$\beta_0 = \frac{(1 + \nu_E)(3 - 4\nu_E)}{2} \cong 1,17$$

$$\beta_1 = \frac{4(1 - \nu_e^2)}{(3 - 2\nu_E)} \cong 1,517$$

λ est un coefficient compris entre 0 et 1 qui exprime la proportion de l'ovalisation totale due aux charges géostatiques qui peut encore se développer après la mise en place du chemisage/tubage ; en l'absence de justification, on prendra $\lambda = 0,6$.

k_2 est le coefficient de pression horizontale du sol ;

ν_E est le coefficient de Poisson du sol égal à 0,3 ;

h est l'épaisseur de la conduite d'accueil ;

D_i est le diamètre intérieur de la conduite, D_e est le diamètre extérieur de la conduite ;

K_μ est le coefficient de microdéformation du sol, égal au rapport entre le module de microdéformation E_μ tel que noté par Ménard [MÉNARD et ROUSSEAU, 1962] et le module pressiométrique Ménard E_M .

Le module de microdéformation caractérise le comportement du sol en petites déformations (typiquement inférieures à 0,1 %), il est adapté à la modélisation des charges roulantes, on peut le considérer comme le module élastique du sol. Il peut être mesuré sur un cycle de déchargement-rechargement du sol, *in situ* lors d'un essai pressiométrique cyclique (NF P94-110-2) ou en laboratoire avec l'essai triaxial cyclique.

Ce coefficient varie typiquement de 3 à 10 (voir plus) en fonction de la nature et de l'état du sol.

Dans le cadre d'une méthode simplifiée, on prendra $K_{\mu} = 3$.

Si l'épaisseur de la conduite d'accueil est inconnue, on prendra $h = 0,1 \times D_i$ et $D_e = 1,2 \times D_i$. La formule se simplifie alors de la manière suivante :

$$Ov_{II,1} = 1,4 \cdot (0,8 - 1,1 \cdot k_2) \cdot \left[0,6 \cdot \frac{P_r}{E_E} \right] \text{ et}$$

$$Ov_{II,2} = 1,46 \cdot \left[\frac{P_{er}}{3 \cdot E_E} \right]$$

Note : la solution analytique d'Herbert Einstein et Charles W. Schwartz résout en déformation plane le problème d'un tube circulaire mis en place dans un massif élastique avec un état de contrainte initial de type géostatique. La fissuration de la conduite d'accueil provoque la mise en charge du chemisage/tubage par le champ de contrainte initiale. La solution analytique de Hoeg résout en déformation plane le problème d'un tube circulaire placé dans un massif élastique soumis à des pressions verticales et horizontales sur les bords du massif. Par ailleurs, le module du sol est augmenté pour tenir compte du faible niveau de déformation dans le sol.

L'ovalisation caractéristique est donnée par :

$$Ov_k = Ov_{II,1} + Ov_{II,2} + Ov_{II,3}$$

L'ovalisation quasi permanente est donnée par :

$$Ov_{qp} = Ov_{II,1} + Ov_{II,3}$$

La somme de l'ovalisation initiale et de l'ovalisation quasi permanente est appelée ovalisation hors charges de trafic :

$$Ov = Ov_0 + Ov_{qp}$$

Il n'est pas nécessaire de prendre en compte l'ovalisation différée dans le cas des tubages mis en œuvre avec un coulis. Dans ce cas le calcul est mené comme dans l'état I.

6.2. Calcul des sollicitations dues à l'ovalisation différée

L'allongement est donné par :

$$\epsilon_{ov} = 2,14 \cdot \frac{v}{r^2} \cdot D_i \cdot Ov_k \text{ (combinaison caractéristique)}$$

$$\epsilon_{ovqp} = 2,14 \cdot \frac{v}{r^2} \cdot D_i \cdot Ov_{qp} \text{ (combinaison quasi permanente)}$$

où v est la distance maximale entre la fibre neutre et l'extrados du profilé.

Note : l'allongement est indépendant du temps.

Le moment de flexion est donné par :

$$M_{ov} = 2,14 \cdot \frac{EI}{r^2} \cdot D_i \cdot Ov_k$$

Les contraintes de calcul à court et à long terme sont données par :

$$\sigma_{ov,d} = \gamma_G \frac{E_0}{(1 - \nu^2)} \epsilon_{ov} \quad \text{et} \quad \sigma_{ov,L,d} = \gamma_G \frac{E_{50}}{(1 - \nu^2)} \epsilon_{ov}$$

6.3. Combinaison des sollicitations dues à la nappe et à l'ovalisation différée

On cumule les contraintes et les déformations calculées.

6.4. Vérifications

On effectue les vérifications suivantes :

• ELU :

– stabilité au flambement sous l'effet de la nappe comme dans l'état I (avec néanmoins la prise en compte d'un défaut de forme correspondant à une ovalisation initiale minimale de 3 %) ;

– résistance à court et long terme :

$$\frac{\sigma_{ov,d}}{\sigma_{fb,d}} \leq 1 \quad \text{et} \quad \frac{\sigma_{ov,L,d}}{\sigma_{fb,L,d}} \leq 1$$

– résistance à long terme avec les sollicitations cumulées (nappe + ovalisation différée) :

$$\left(\frac{\sigma_{we,d}}{\sigma_{fb,L,d}} \right) + \left(\frac{\sigma_{ov,L,d}}{\sigma_{fb,L,d}} \right)^2 \leq 1$$

• ELS :

– ovalisation totale à long terme (combinaison quasi permanente) :

$$Ov \leq 10 \%$$

– allongement à long terme pour certains produits (composite verre) avec les sollicitations cumulées (combinaison quasi permanente).

$$\epsilon_{we} + \epsilon_{ovqp} \leq \epsilon_{LT}$$

7. Justification des chemisages et tubages circulaires pour l'état d'accueil III

On suppose que le tuyau d'accueil est totalement dégradé et est assimilable au sol encaissant. Il retransmet simplement les charges au chemisage-tubage (figure 23).

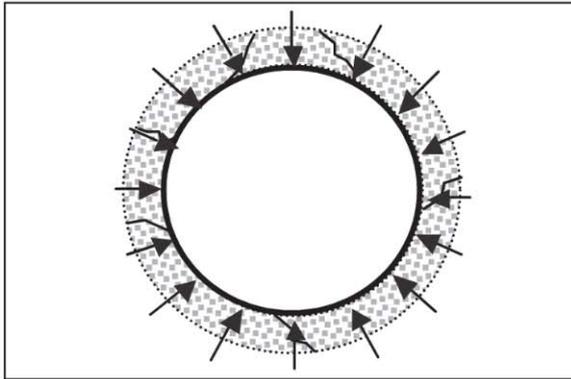


Figure 23. Transmission des charges sur le chemisage/tubage dans le cas de l'état d'accueil III

Mécaniquement, c'est la diminution de raideur du tuyau d'accueil qui provoque le transfert d'une partie des charges vers le chemisage-tubage. À long terme, on suppose que la raideur du tuyau d'accueil tend vers celle du sol. Le chemisage-tubage s'ovalise, ce qui provoque une redistribution des pressions et notamment l'augmentation de la pression horizontale qui permet au chemisage-tubage souple de résister à la pression verticale.

Ce transfert de charge est assez similaire à celui qui se produit entre le sol et le soutènement d'un tunnel. L'étude théorique de ce transfert est complexe, car elle nécessite la résolution d'un problème d'interaction sol-structure.

Dans le cadre de cette méthode simplifiée, on utilise la solution analytique établie par Einstein et Schwartz (précédemment utilisée pour l'état d'accueil II) qui est la plus explicite en ce qui concerne le calcul élastique linéaire en déformation plane d'une coque dans un massif. Einstein et Schwartz ont étudié deux configurations d'interface : adhérence parfaite et glissement parfait, cette seconde configuration plus défavorable a été retenue.

On remarquera que la solution d'Einstein-Schwartz est basée sur la théorie du continuum élastique linéaire pour la modélisation du sol (contrairement aux solutions fondées sur le modèle de Winkler où le sol est modélisé avec des ressorts indépendants) et qu'elle donne des résultats proches de la méthode de calcul aux éléments finis (avec les mêmes hypothèses bien sûr).

L'effet des charges dynamiques de surface est modélisé avec la solution analytique de Hoeg comme pour l'état II.

À la différence de l'état II, la rigidité en flexion du chemisage/tubage n'est pas négligée.

7.1. Calcul des sollicitations

L'ovalisation différée est donnée par les formules suivantes :

$$Ov_{III,1} = \frac{\beta_2}{48 \cdot S_L} \cdot \left[\frac{(1 - k_2 \cdot p_r)}{[1 + \alpha_2 \cdot F_L]} \right] \quad (\text{charges géostatiques})$$

$$Ov_{III,2} = \frac{\beta_3}{48 \cdot S_L} \cdot \left[\frac{P_{er}}{[1 + \alpha_3 \cdot K_\mu \cdot F_L]} \right] \quad (\text{charges de trafic})$$

$$Ov_{III,3} = \frac{\beta_3}{48 \cdot S_L} \cdot \left[\frac{P_{ep}}{[1 + \alpha_3 \cdot K_\mu \cdot F_L]} \right] \quad (\text{charges permanentes})$$

où :

S_L est la rigidité annulaire à long terme :

$$S_L = \frac{EI_L}{8 \cdot r^3} = \frac{E_{50,k} \cdot I}{8 \cdot (1 - \nu^2) \cdot r^3}$$

Dans le cas d'un tubage : $S_L = S_{50,wet}$

F_L est le coefficient de rigidité relative à long terme :

$$F_L = \frac{E_E}{8 \cdot S_L \cdot (1 - \nu_E^2)} = \frac{E_E \cdot r^3}{EI_L \cdot (1 - \nu_E^2)} = \frac{E_E \cdot r^3 \cdot (1 - \nu^2)}{E_{50,k} \cdot I \cdot (1 - \nu_E^2)}$$

$$\alpha_3 = \frac{(1 - \nu_E)(3 - 2\nu_E)}{12(3 - 4\nu_E)} \cong 0,078 \quad \alpha_2 = \frac{(1 - \nu_E)}{3(5 - 6\nu_E)} = 0,073 \quad (\nu_E = 0,3)$$

$$\beta_2 = \frac{(3 - 4\nu_E)}{(5 - 6\nu_E)} \cong 0,5625$$

$$\beta_3 = \frac{2(1 - \nu_E)}{(3 - 4\nu_E)} \cong 0,778$$

K_μ est le coefficient de microdéformation du sol (voir état d'accueil II).

L'ovalisation caractéristique est donnée par :

$$Ov_k = Ov_{II,1} + Ov_{II,2} + Ov_{II,3}$$

L'ovalisation quasi permanente est donnée par :

$$Ov_{qp} = Ov_{II,1} + Ov_{II,3}$$

L'ovalisation hors charges de trafic est égale à la somme de l'ovalisation initiale et de l'ovalisation quasi permanente :

$$Ov = Ov_0 + Ov_{qp}$$

On suppose que le chemisage-tubage se déforme elliptiquement. L'allongement (au second ordre) est alors donné par :

$$\epsilon_{ov} = \frac{3 \cdot Ov_k}{1 - 2 \cdot Ov_k} \cdot \frac{v}{r} \quad \epsilon_{ov,qp} = \frac{3 \cdot Ov_{qp}}{1 - 2 \cdot Ov_{qp}} \cdot \frac{v}{r}$$

(combinaison quasi permanente)

où v est la distance entre la fibre neutre et l'extrados du profilé.

Le moment de flexion est donné par :

$$M_{ov} = \frac{3 \cdot Ov_k}{1 - 2 \cdot Ov_k} \cdot \frac{EI}{r}$$

Les contraintes de calcul à court et à long terme sont données par :

$$\sigma_{ov,d} = \gamma_G \frac{E_0}{(1 - \nu^2)} \epsilon_{ov} \quad \text{et} \quad \sigma_{ov,L,d} = \gamma_G \frac{E_{50}}{(1 - \nu^2)} \epsilon_{ov}$$

7.2. Flambement multionde

La pression critique multionde de calcul est donnée par GUMBEL [1983] :

$$P_{cr,m,d} = 1,2 \cdot C_n \cdot \left[\frac{EI_{L,d}}{r^3} \right]^{1/3} \cdot \left[\frac{E_E}{(1 - \nu_E^2)} \right]^{2/3} = 1,32 \cdot S_{L,d}^{1/3} \cdot \left[\frac{E_E}{(1 - \nu_E^2)} \right]^{2/3}$$

où :

$$S_{L,d} = \frac{S_L}{\gamma_{ME}}$$

$C_n = 0,55$ est un facteur de sécurité qui prend en compte la variabilité des résultats expérimentaux et le comportement non linéaire des sols.

7.3. Vérifications

On effectue les vérifications suivantes :

- ELU :
 - stabilité au flambement sous l'effet de la nappe à long terme comme dans l'état I ;
 - stabilité au flambement multionde à long terme :

$$\frac{P_{vd} + P_{we,d}}{P_{cr,m,d}} \leq 1$$

- résistance ou allongement à court et à long terme.

- ELS :
 - ovalisation à long terme (combinaison quasi permanente) ;
 - $Ov = Ov_0 + Ov_L \leq 10\%$
 - déformation à long terme pour certains produits (combinaison quasi permanente).

Partie 2. Cas des sections non circulaires

8. Justification des chemisages ou tubages non circulaires sous l'action de la nappe pour l'état d'accueil I

Une méthode générale de calcul des chemisages non circulaires est exposée dans le guide technique « Restructuration des collecteurs visitables », t. 2, édition Lavoisier [RERAU, 2004]. Dans le cadre d'une méthode simplifiée, il n'est pas possible de traiter les profils non circulaires dans leurs généralités, on donne toutefois les pressions critiques de flambement de profils ovoïdes courants.

8.1. Comportement mécanique des chemisages/tubages soumis à une pression hydrostatique externe

Le chemisage/tubage est soumis à l'action d'une pression hydrostatique externe qui s'applique au niveau de son interface avec le support, qui est supposée parfaitement glissante. Sous l'effet de cette pression, le chemisage/tubage se déforme et certaines parties se décollent en formant un ou plusieurs « lobes ». Les lobes évoluent en extension et en hauteur en fonction de la pression et de la forme du profil. Certaines formes résistent mieux à la pression, ce sont les formes circulaires ou celles formées d'arcs de cercle. Les formes qui comportent des parties rectilignes sont moins favorables.

8.1.1. Cas des profils qui ne comportent que des arcs de cercle

Un arc résiste bien à une pression externe, car elle produit majoritairement une compression et très peu de flexion. Dans un chemisage plaqué et formé d'arcs, un lobe ne peut se développer que par l'effet de raccourcissement dû à la compression.

Le lobe de déformation se développe préférentiellement dans l'arc de plus grand rayon, car la compression y est la plus forte. On observe généralement un seul lobe, on parle de mode de déformation « mono-lobe », si la géométrie du chemisage comporte deux arcs de plus grands rayons le plus souvent symétriques comme dans les ovoïdes, on peut observer deux lobes simultanément, on parle alors de mode « bi-lobes » (figure 24).

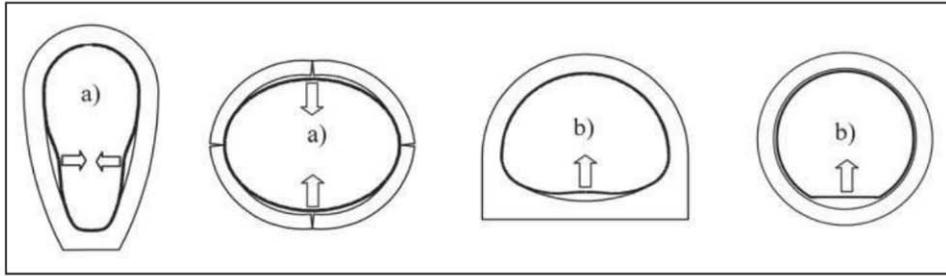


Figure 24. Exemples de profils (a) et (b)

L'ouverture angulaire du lobe diminue avec l'augmentation de la pression (le lobe se localise) et tend vers une valeur critique α_{cr} où il devient instable. On observe alors le flambement du chemisage. La pression critique de flambement du lobe est très sensible aux imperfections de forme (vide annulaire notamment) et au rayon de courbure.

8.1.2. Cas des profils qui comportent des parties droites

Le lobe de déformation se développe préférentiellement dans la partie droite la plus longue. La partie rectiligne se décolle instantanément alors que les parties courbes adjacentes résistent par effet de voûte. Le lobe se développe par effet de flexion et, comme la raideur en flexion est nettement plus faible que la raideur en compression, son développement est rapide : des déflexions supérieures à 10 % de la longueur droite peuvent être obtenues facilement. On n'observe pas d'instabilité de flambement, mais un décollement qui tend à s'accélérer avec la pression. Au lieu de diminuer en extension, le lobe s'étend sur

les parties adjacentes de la partie droite et son extension progresse avec la pression.

8.1.3. Profils critiques et « sous-critiques »

Les profils formés d'arcs de cercle sont appelés « critiques » et ceux qui comportent des parties rectilignes sont appelés « sous-critiques » (figure 25).

Les profils critiques sont nettement moins déformables que les profils sous-critiques, mais leur résistance est limitée par la pression critique de flambement qui est très sensible aux imperfections de forme et qui décroît rapidement avec l'augmentation du rayon de courbure. Lorsque ce rayon devient très grand, on observe plus de flambement et on tend vers le comportement sous-critique.

Les profils critiques résistent bien mieux à la pression externe que les profils sous-critiques. Pour une pression donnée et à caractéristiques mécaniques égales (épaisseur et module), les sollicitations de flexion et les déplacements sont nettement plus faibles dans un profil critique que dans un profil sous-critique (figure 26).

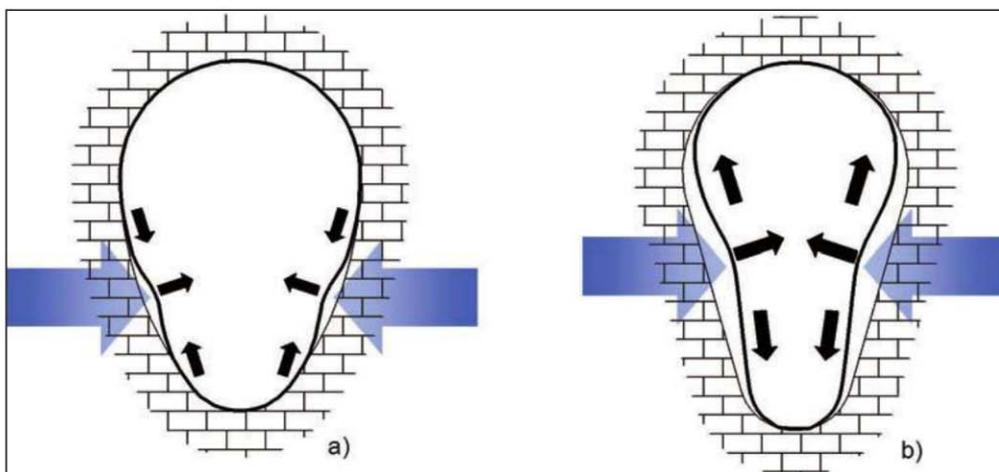


Figure 25. (a) Profil critique : le lobe se localise ; (b) profil sous-critique : le lobe s'étend progressivement à tout l'ovoïde (décollement progressif)

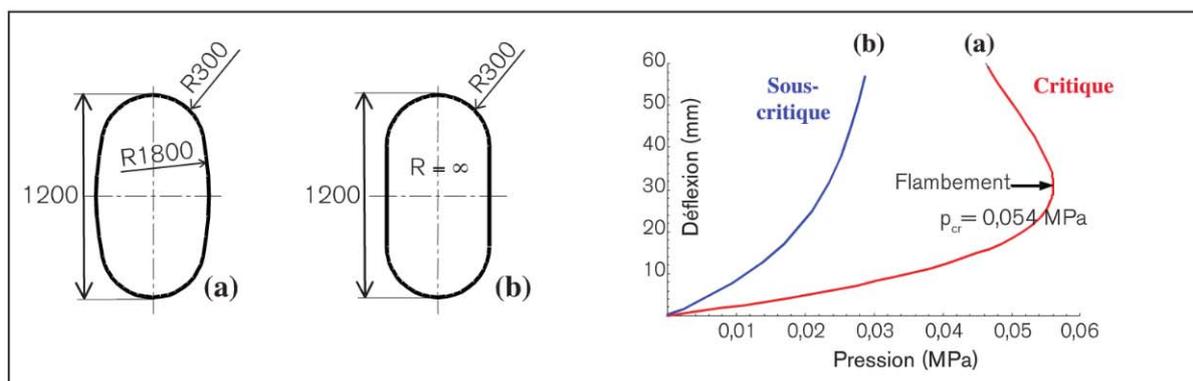


Figure 26. Courbe de déflexion au centre du lobe pour un profil critique (a) et un profil sous-critique (b), les deux profils ayant les mêmes caractéristiques mécaniques

8.2. Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques à prendre en compte sont les mêmes que pour les sections circulaires.

8.3. Calcul des profils non circulaires formés d'arcs de cercle

8.3.1. Profils calculables

Les profils calculables sont convexes, formés d'arcs tangents à leurs points de contact (figure 27). On s'intéresse plus particulièrement aux profils ovoïdes.

8.3.2. Conditions d'application de la méthode

8.3.2.1. Cas du chemisage

Il convient de disposer d'un relevé du profil de l'ouvrage et notamment du rayon de courbure des piédroits qui joue un rôle très important dans la résistance au flambement.

Dans le cas d'un ovoïde, si le rayon de courbure du piédroit n'est pas connu, on supposera que le piédroit est rectiligne et on appliquera la méthode pour les profils avec parties rectilignes (ce qui peut être très pénalisant).

Dans le cas d'un « grand » rayon de courbure, on pourra appliquer la méthode pour les profils avec parties rectilignes et retenir la méthode la plus favorable.

8.3.2.2. Cas du tubage

On utilise le profil spécifié au fournisseur par le bureau d'études ou l'entreprise. Dans le cas d'un étaieage interne, il n'y a pas lieu de majorer les rayons de courbure.

8.3.3. Limite de validité des calculs

La solution analytique suppose que le lobe de déformation est contenu dans un seul arc de rayon r. Toutefois, des comparaisons avec la méthode des

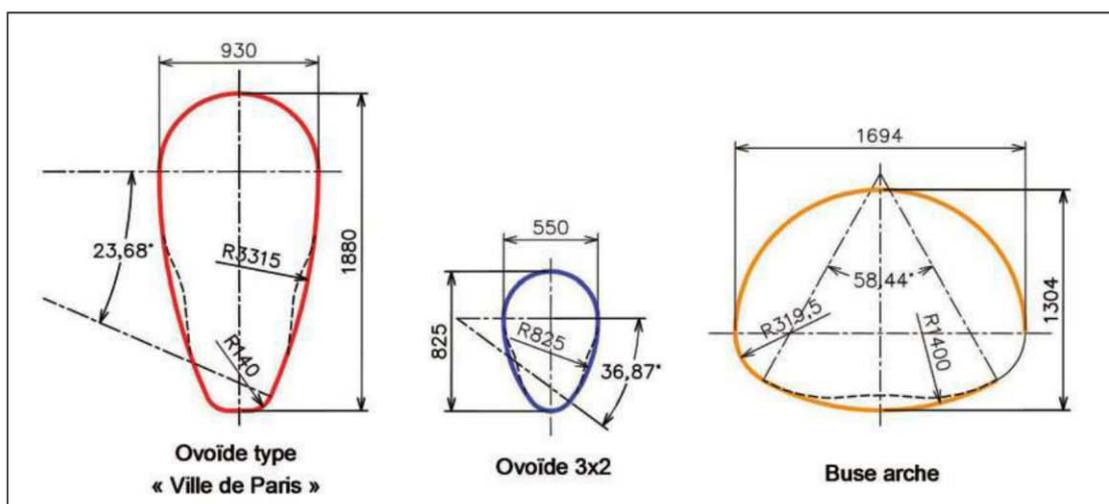


Figure 27. Profils calculables

éléments finis montrent que les écarts sur la pression critique sont négligeables (inférieurs à 5 %) tant que la condition suivante est vérifiée :

$$\alpha/\alpha_{cr} \geq 0,6$$

où $2x\alpha_{cr}$ est l'angle du lobe au moment du flambement et $2x\alpha$ est l'extension angulaire de l'arc de plus grand rayon.

Cette condition est toujours vérifiée pour les profils de types 3x2 ou normalisés (NF P 16-401).

Si cette condition n'est pas remplie, les résultats de calcul seront sécuritaires (c'est-à-dire que la pression critique sera sous-estimée). Dans ce dernier cas, il peut être plus avantageux d'utiliser la méthode de calcul pour les renforts sous-critiques en linéarisant l'arc ($r = \infty$).

8.3.4. Valeurs des imperfections à prendre en compte (état d'accueil I ou II)

Vide annulaire

Dans le cas des chemisages ou tubages non circulaires, la seule imperfection imposée est le vide annulaire.

- Cas des tubages

Pour les tubages avec vide annulaire injecté, on admet que le vide annulaire résiduel est nul ($g = 0$), en négligeant l'effet du retrait du coulis.

- Cas des chemisages polymérisés en place – État d'accueil I

Le vide annulaire g est forfaitairement égal à 0,5 % du rayon équivalent. Cette valeur couvre les effets défavorables d'une imperfection de forme affine de la figure de flambement du chemisage.

Vide annulaire : $g = (0,5 \%) r_{eq}$

r_{eq} = rayon du cercle de même périmètre = $P/2\pi$

- État d'accueil II

Le vide annulaire g est forfaitairement égal à 1 % du rayon équivalent. Cette valeur couvre les effets défavorables d'une imperfection de forme affine de la figure de flambement du chemisage.

Vide annulaire : $g = (1 \%) r_{eq}$

8.3.5. Calcul de la pression critique de flambement

La pression critique de flambement d'un profil non circulaire convexe est donnée par THEPOT [2000b] :

$$P_{cr,we} = 2,02 \cdot k^{0,4} \cdot \kappa_{p,g} \cdot \frac{EI^{0,6} \cdot EA^{0,4}}{p^{0,4} \cdot r^{1,8}}$$

où :

r : le rayon de courbure de la zone de plus grand rayon de courbure du profil (les piédroits pour un ovoïde) ;

p : périmètre mesuré au niveau de l'axe neutre de la paroi ;

$\kappa_{p,g}$: facteur de réduction de la pression critique dû au vide annulaire g ;

k : nombre de lobes ($k = 2$ pour un profil ovoïde, $k = 1$ pour une buse, figure 28).

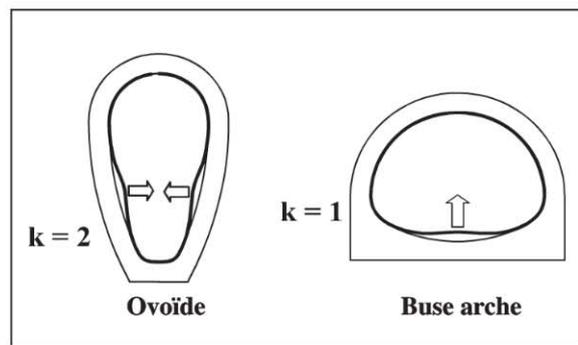


Figure 28. Lobes de déformation pour un profil ovoïde et un profil arche

Pour un matériau homogène et une paroi structurée :

$$P_{cr,we} = 2,02 \cdot k^{0,4} \cdot \kappa_p \cdot \frac{E_{50,k}}{1-\nu^2} \cdot \frac{I^{0,6} \cdot A^{0,4}}{p^{0,4} \cdot r^{1,8}}$$

Pour un matériau plein, homogène, d'épaisseur constante e et de module différé E_x :

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

Remarque : la formule de la pression critique a été établie dans l'hypothèse où on peut négliger les déplacements d'effort tranchant par rapport aux déplacements d'effort fléchissant, ce qui exclut les matériaux sandwiches.

8.3.6. Calcul des facteurs de correction dus au vide annulaire

On calcule le vide annulaire réduit δ_g :

$$\delta_g = \frac{1}{k^{0,4}} \frac{2g}{r} \left[\frac{\pi}{2} \frac{EA}{EI} \frac{r^3}{P} \right]^{0,6}$$

où k est le nombre de lobes de déformation ($k = 2$ pour les ovoïdes).

Pour un matériau plein et homogène d'épaisseur e :

$$\delta_g = 11,65 \frac{g}{k^{0,7}} \frac{r^{0,8}}{p^{0,6} e^{1,2}}$$

Le facteur de réduction de la pression critique est donné par :

$$\kappa_{pg} = \frac{1}{1 + 0,38 \cdot \delta_g}$$

8.3.7. Calcul des sollicitations et des déplacements

À l'instant du flambement, l'angle d'ouverture du lobe de déformation α_{cr} est minimal et la flèche du lobe d_{cr} est maximale, les sollicitations prennent les valeurs critiques M_{cr} pour le moment fléchissant et N_{cr} pour l'effort normal (figure 29).

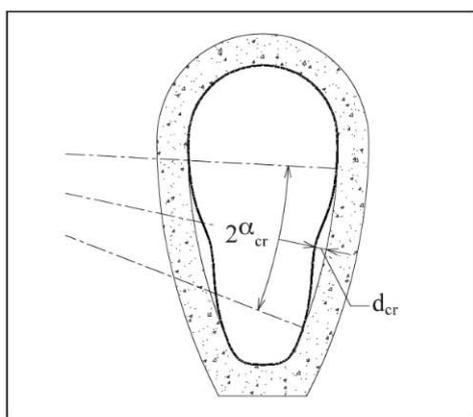


Figure 29. Angle critique et déflexion critique

L'angle critique de flambement exprimé en radians est donné par :

$$\alpha_{cr} = \kappa_{\alpha,g} \cdot \frac{2,54}{k^{0,2}} \cdot \left[\frac{EI_L}{EA_L} \cdot \frac{P}{r^3} \right]^{0,2}$$

Dans le cas d'un matériau plein et homogène :

$$\alpha_{cr} = \kappa_{\alpha,g} \cdot \frac{1,55}{k^{0,2}} \cdot \frac{e^{0,4} \cdot p^{0,2}}{r^{0,6}}$$

Le facteur d'amplification de l'angle critique est donné par :

$$\kappa_{\alpha,g} = 1 + 0,15 \cdot \delta_g$$

La flèche critique au milieu du lobe de déformation est donnée par :

$$d_{cr} = \kappa_{d,g} \cdot \frac{1,35}{k^{0,4}} \cdot r \cdot \left[\frac{EI_L}{EA_L} \cdot \frac{P}{r^3} \right]^{0,4}$$

Pour un matériau plein, homogène, d'épaisseur constante e :

$$d_{cr} = \kappa_{d,g} \cdot \frac{0,5}{k^{0,4}} \cdot \frac{e^{0,8} \cdot p^{0,4}}{r^{0,2}}$$

Le facteur d'amplification de la flèche critique est donné par :

$$\kappa_{d,g} = 1 + 0,51 \cdot \delta_g$$

Le moment fléchissant critique est donné par :

$$M_{cr} = 1,2 \cdot \kappa_M \cdot \frac{EI_L}{r}$$

où $\kappa_M = 1,1$ (valeur forfaitaire) est le facteur d'amplification dû aux imperfections.

Pour un matériau plein, homogène, isotrope d'épaisseur e :

$$M_{cr,we} = 0,1 \cdot \kappa_M \cdot \frac{E_{50,k}}{1 - \nu^2} \cdot \frac{e^3}{r}$$

Le moment fléchissant est maximal au centre du lobe de déformation et aux deux points de contact du lobe avec le support; il est nul en dehors du lobe. L'effort normal est constant sur tout le périmètre (figure 30).

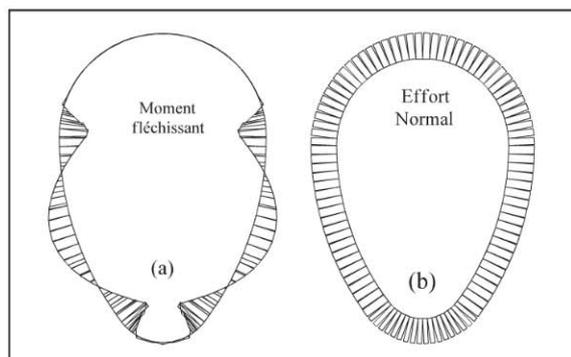


Figure 30. Répartition du moment fléchissant et de l'effort normal dans le cas d'un chemisage 3x2 soumis à une pression

Le moment fléchissant maximal par unité de longueur est donné par l'expression suivante :

$$M_{we} = \frac{0,5 \cdot \left(\frac{P_{we}}{P_{cr,we}} \right) \cdot M_{cr}}{1 - 0,5 \cdot \left(\frac{P_{we}}{P_{cr,we}} \right)^2}$$

L'effort normal par unité de longueur en fonction de la pression de calcul est donné par :

$$N = p_{we} \cdot r$$

Note : le moment fléchissant varie de manière non linéaire avec la pression de la nappe, il est maximal à long terme.

Expression du moment de calcul :

$$M_{we,d} = \frac{0,5 \cdot \left(\frac{P_{we,d}}{P_{cr,we}} \right) \cdot M_{cr}}{1 - 0,5 \cdot \left(\frac{P_{we,d}}{P_{cr,we}} \right)^2}$$

Dans le cas d'un matériau plein et homogène d'épaisseur e :

$$\sigma_{we} = \frac{6 \cdot M_{we}}{e^2} \quad \varepsilon_{we} = \frac{\sigma_{we}}{E_{50,k}} (1 - \nu^2)$$

$$\sigma_{we,d} = \frac{6 \cdot M_{we,d}}{e^2} \quad \varepsilon_{we,d} = \frac{\sigma_{we,d}}{E_{50,k}} (1 - \nu^2)$$

La flèche au milieu du lobe de déformation est donnée par :

$$d = d_{cr} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{P_{we}}{P_{cr}} \right)^{0.5} \right]$$

8.4. Vérifications à effectuer pour le dimensionnement de la réhabilitation

On effectue les vérifications suivantes :

• ELU :

– contrainte ou allongement à long terme :

$$\frac{\sigma_{we,d}}{\sigma_{fb,d}} \leq 1 \quad \text{ou} \quad \frac{\varepsilon_{we,d}}{\varepsilon_{fb,d}} \leq 1$$

– Stabilité au flambement à long terme :

$$\frac{P_{we,d}}{P_{cr,we,d}} \leq 1 \quad \text{avec} \quad P_{cr,we,d} = \frac{P_{cr,we}}{\gamma_{ME}}$$

• ELS :

– allongement à long terme pour certains produits (composite verre) ;

– flèche du lobe de déformation. On pourra prendre par défaut une flèche limite égale à 2 % de la plus petite dimension de l'ouvrage.

8.5. Calcul des profils non circulaires avec des parties rectilignes

8.5.1. Formes calculables

La figure 31 montre les principales géométries concernées : (a) ovale à un rayon de courbure, (b) ovale à

deux rayons de courbure, (c) ovoïde à piédroits rectilignes, (d) section rectangulaire avec angles arrondis, (e) buse arche à radier plat.

Toutes ces formes convexes comportent une partie rectiligne dont la longueur est une proportion importante de la plus grande dimension.

Les formes qui ne comportent pas de parties strictement rectilignes sont modélisées en considérant que l'arc de plus grand rayon a une courbure nulle. Cette simplification est sécuritaire.

8.5.2. Paramètres géométriques

Les paramètres géométriques du profil sont le périmètre P mesuré au niveau de la fibre neutre, la longueur de la partie droite L , les rayons des arcs adjacents r_1 et r_2 .

8.5.3. Imperfections de forme

Les formes sous-critiques sont beaucoup moins sensibles aux imperfections de forme (vide annulaire) que les formes critiques, car elles bénéficient moins de l'effet de coffrage.

Pour les chemisages polymérisés en place, on ne prend pas en compte le vide annulaire résiduel.

8.5.4. Déformation limite

La déflexion maximale du lobe de déformation doit être limitée pour d'évidentes raisons de fonctionnement. La limitation de flèche est particulièrement importante pour la tenue des branchements.

On pourra prendre par défaut une flèche limite égale à 3 % de la longueur droite où se développe le lobe de déformation.

8.5.5. Déroulement des calculs

On choisit d'abord la flèche au milieu du lobe. On calcule ensuite les angles de décollement du lobe.

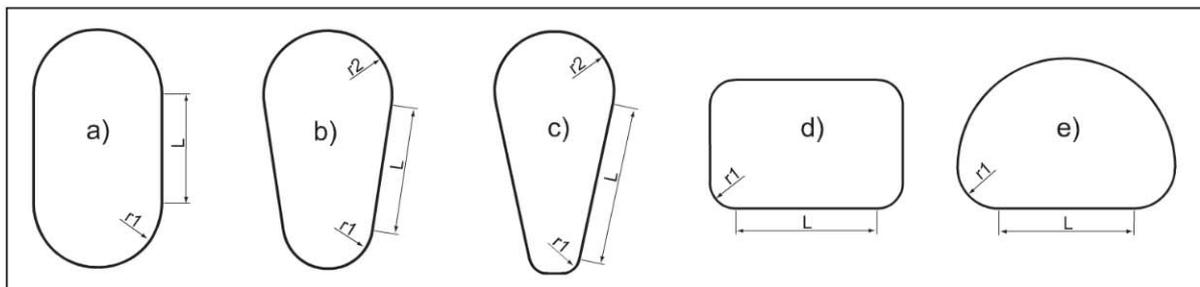


Figure 31. Profils non circulaires à parties rectilignes - Formes calculables

8.5.6. Limites de validité des calculs

Les formules de calcul ont été établies sous les conditions suivantes :

- la longueur de la partie droite doit être supérieure à 1,5 fois le plus grand des deux rayons adjacents ;
- dans le cas des sections rectangulaires à coins arrondis, le rapport entre la plus grande et la plus petite longueur droite doit être supérieur à 1,5.

Si ces conditions ne sont pas remplies, les résultats de calcul seront sécuritaires. Si l'on souhaite des résultats plus précis, on utilisera la méthode des éléments finis en grands déplacements.

8.5.7. Paramétrage du lobe de déformation

On considère l'ovale à 2 rayons de courbure de la figure 32.

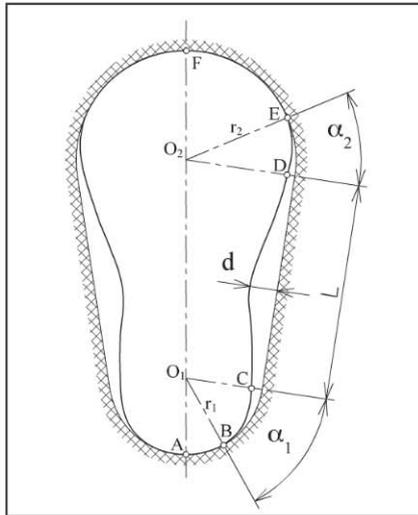


Figure 32. Paramétrage du lobe de déformation

Le lobe de déformation s'étend sur toute la longueur droite du piédroit et sur une partie de la voûte et du radier. La géométrie du lobe se caractérise par trois paramètres : la flèche maximale d et les angles de décollement α_1 en radier et α_2 en voûte. La longueur développée du lobe D est égale à $L + \alpha_1 r_1 + \alpha_2 r_2$.

On détermine les paramètres adimensionnels suivants :

$$m = \frac{EI_L}{L^3}, \quad \beta = \frac{EI_L}{EA_L} \cdot \frac{P}{L^3}, \quad \lambda = \frac{d}{L}, \quad \theta_1 = \frac{r_1}{L}, \quad \theta_2 = \frac{r_2}{L}, \quad g_{12} = 1 + \sqrt{\frac{r_1}{r_2}}$$

Dans le cas d'un matériau plein et homogène :

$$m = \frac{E_{50,k}}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{e^3}{L^3}, \quad \beta = \frac{e^2}{12} \cdot \frac{P}{L^3}$$

On recherche la solution correspondant à la flèche admissible en service d_L .

8.5.8. Calcul des angles de décollement du lobe

L'angle de décollement α_2 est la (seule) racine réelle (positive) du polynôme de degré 5 suivant [THEPOT, 2001a] :

$$120\beta + 9\lambda^2 + g_{12}\theta_2(120\beta + 18\lambda^2)\alpha_2 + (12\lambda\theta_2 + 9\lambda^2g_{12}^2\theta_2^2)\alpha_2^2 - 12\lambda g_{12}^2\theta_2^3\alpha_2^3 - 16g_{12}\theta_2^3\alpha_2^4 = 0$$

Pour ce calcul, il est nécessaire d'utiliser une méthode numérique itérative (Newton-Raphson, par exemple). On pourra initialiser le calcul en utilisant la solution de l'équation qui donne l'angle de décollement initial pour un décollement nul ($\lambda = 0$) :

$$120\beta + 120\beta g_{12}\theta_2\alpha_2 - 16g_{12}\theta_2^3\alpha_2^5 = 0$$

L'angle de décollement α_1 est donné par : $\alpha_1 = \sqrt{\frac{r_2}{r_1}}\alpha_2$

8.5.9. Vérification de l'angle de décollement

On doit vérifier que l'angle de décollement en radier α_1 est inférieur à l'angle du radier. Dans le cas général de l'ovale à deux rayons, on doit vérifier la relation suivante :

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \arctan \left| \frac{r_2 - r_1}{L} \right|$$

Si la relation n'est pas vérifiée, il faut reprendre le calcul avec une déflexion limite plus petite (d_L ne convient pas).

8.5.10. Calcul de la pression de service et des sollicitations en fonction de la flèche

On calcule d'abord les deux paramètres suivants :

$$\eta = 1 + \alpha_2\theta_2g_{12} \quad \text{et} \quad \gamma = g_{12}\theta_2^2\alpha_2^3$$

Pression en fonction de la flèche relative :

$$P_\lambda = \frac{4\pi^4 m}{\eta^4} \cdot \lambda \cdot \left[\left(1 + \frac{\gamma^2}{9\beta\eta} \right) - \frac{\gamma}{4\beta} \cdot \lambda + \frac{\eta}{8\beta} \cdot \lambda^2 \right]$$

Moment fléchissant maximal au centre du lobe :

$$M_\lambda = \frac{2\pi^2 EI_L}{L} \cdot \frac{\lambda}{\eta^2}$$

Contrainte de flexion maximale (pour un matériau plein et homogène) :

$$\sigma_\lambda = \pi^2 \cdot \frac{E_{50,k}}{1-\nu^2} \cdot \frac{e}{L} \cdot \frac{\lambda}{\eta^2}$$

$$\varepsilon_\lambda = \pi^2 \cdot \frac{e}{L} \cdot \frac{\lambda}{\eta^2}$$

Note : l'effort normal est négligeable.

8.5.11. Vérifications à effectuer

- ELS :

On doit vérifier que la flèche maximale au milieu du lobe d est inférieure à la valeur limite d_λ que l'on s'est fixée (2 % × L en principe). Cette condition est équivalente à :

$$P_{we,d} \leq P_\lambda$$

à compléter par une vérification de l'allongement à long terme pour certains produits (composite verre).

- ELU de résistance :

Lorsque la condition $p_{we,d} \leq p_\lambda$ est satisfaite, on peut calculer le moment de flexion de calcul ou la contrainte de calcul de façon sécuritaire par la formule d'interpolation suivante :

$$M_{we,d} = \frac{P_{we,d}}{P_\lambda} M_\lambda \quad \sigma_{we,d} = \frac{P_{we,d}}{P_\lambda} \sigma_\lambda$$

Dans le cas contraire, on choisit une nouvelle valeur de λ qui permet de vérifier l'inégalité :

$$\frac{\sigma_{we,d}}{\sigma_{fb,d}} \leq 1 \quad \text{ou} \quad \frac{\epsilon_{we,d}}{\epsilon_{fb,d}} \leq 1$$

8.6. Formulaire de calcul des ovoïdes courants

La figure 33 donne les pressions critiques de flambement de trois profils ovoïdes courants paramétrés par leur hauteur, dans le cas d'un matériau plein et homogène d'épaisseur e de module différé E_x et en mode bi-lobes. Pour utiliser ces formules, il est indispensable de mesurer le profil de l'ouvrage d'accueil et notamment le rayon de courbure R des piédroits (où se développe le lobe de déformation) ainsi que le périmètre.

On doit s'assurer que les rayons de courbure mesurés sont inférieurs (avec une tolérance de 10 %) aux valeurs paramétrées.

Si $R \leq 1,1 H$, on applique le modèle 3 × 2 (H = hauteur de l'ovoïde).

Si $1,1 H < R \leq 1,9 H$, on applique le modèle 2 × 1.

Si $R > 1,9 H$, on peut appliquer la formule générale de la pression critique de flambement.

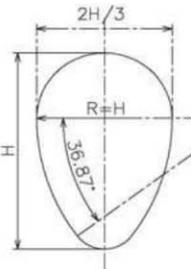
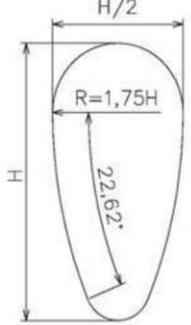
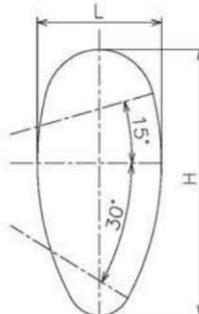
| Ovoïde 3 × 2 | Ovoïde 2 × 1 | Ovoïde normalisé (NF P 16-401) |
|--|--|--|
|  <p>$P = 2,643 \times H$ $R = H$ $R_{eq} = 0,421 \times H$</p> |  <p>$P = 2,461 \times H$ $R = 1,75 \times H$ $R_{eq} = 0,392 \times H$</p> |  <p>$P = 1,762 \times H + 1,38 \times L$ $R = 1,526 \times H - 1,026 \times L$ $R_{eq} = 0,28 \times H + 0,22 \times L$</p> |
| $P_{cr} = 0,407 \cdot \kappa_{p,g} \cdot \frac{E_{50,k}}{1 - \nu^2} \cdot \left(\frac{e}{H}\right)^{2,2}$ $\kappa_{p,g} = \frac{1}{1 + 0,785 \cdot g \cdot \left(\frac{H}{e}\right)^{1,2}}$ <p>État 1 : g = 0,005 État 2 : g = 0,01</p> | $P_{cr} = 0,153 \cdot \kappa_{p,g} \cdot \frac{E_{50,k}}{1 - \nu^2} \cdot \left(\frac{e}{H}\right)^{2,2}$ $\kappa_{p,g} = \frac{1}{1 + 1,2 \cdot g \cdot \left(\frac{H}{e}\right)^{1,2}}$ | $P_{cr} = \frac{1,32}{A^{0,4} B^{1,8}} \cdot \kappa_{p,g(1\%)} \cdot \frac{E_x}{1 - \nu_T^2} \cdot \left(\frac{e}{H}\right)^{2,2}$ <p>A = (0,56 + 0,44λ) B = (3,05 - 2,05λ) λ = L/H</p> $\kappa_{p,g(1\%)} = \frac{1}{1 + 0,484 \cdot g \cdot A^{0,4} \cdot B^{0,8} \cdot \left(\frac{H}{e}\right)^{1,2}}$ |

Figure 33. Expression des pressions critiques de flambement des ovoïdes courants

9. Justification des chemisages ou tubages non circulaires pour l'état d'accueil II

9.1. Cas des chemisages

On doit évaluer la capacité de résistance à la pression hydrostatique externe du chemisage en prenant en compte les possibilités de mouvements ultérieurs des parois de l'ouvrage d'accueil.

Dans le cas d'un ovoïde, on doit encore distinguer les deux cas de déformations :

9.1.1. Cas de divergence des piédroits (ou affaissement de voûte)

L'affaissement de la voûte n'a pas d'influence sur la capacité de résistance au flambement d'un chemisage critique qui tient au rayon de courbure des piédroits. On augmente toutefois le vide annulaire forfaitairement à 1 % du rayon équivalent, ce qui réduit sensiblement la pression critique de flambement.

9.1.2. Cas de convergence (bombement) d'un ou des deux piédroits

Il est clair que la convergence des piédroits a un effet négatif sur la résistance au flambement. Pour prendre en compte la diminution du rayon de courbure des piédroits, on peut linéariser le piédroit et appliquer la méthode pour les profils avec parties rectilignes. Dans le cas d'un bombement (courbure négative), seule la méthode des éléments finis en grands déplacements est applicable.

9.2. Cas des tubages injectés

Dans le cas des tubages injectés, on préconise l'utilisation d'un coulis de résistance en compression supérieure à 12 MPa. Le coulis augmente la capacité de résistance de la maçonnerie (notamment vis-à-vis des efforts dynamiques) et assure le blocage des fissures les plus ouvertes, ces deux effets diminuent considérablement les risques de mouvements ultérieurs.

Dans ces conditions, le tubage est justifié vis-à-vis de la pression hydrostatique externe comme pour l'état d'accueil I. On considère que la nappe peut s'infiltrer à long terme entre le coulis et le tubage.

10. Justification des chemisages ou tubages par étude aux éléments finis pour l'état d'accueil III

La vérification de la tenue des chemisages/tubages (circulaires ou non) peut s'effectuer en utilisant la

méthode des éléments finis. Cette approche est tout particulièrement recommandée dans les cas suivants : ouvrages de grandes dimensions, de forme non circulaire, altérations importantes et/ou évolutives des matériaux (buses métalliques), conditions de chargement particulièrement sévères (faible hauteur de couverture sous voirie lourde, ouvrages profonds...).

10.1. Contribution de l'ouvrage existant

Diverses natures de contribution peuvent être envisagées.

Dans tous les cas, l'ouvrage va servir de coffrage. Il importe donc toujours de bien connaître sa géométrie d'intrados. Même si l'on suppose que l'ouvrage ne pourra pas contribuer à la résistance après renforcement, c'est lui qui va transmettre un certain nombre de charges au chemisage/tubage.

Dans le cas de la réhabilitation d'une buse métallique ou d'un ouvrage dont le matériau est fortement altéré, on pourra négliger la structure existante et assimiler ses caractéristiques mécaniques à celles du sol. Dans le cas d'une maçonnerie altérée, il est possible de prendre en compte ses caractéristiques mécaniques résiduelles, notamment si on dispose d'un diagnostic. Les caractéristiques mécaniques intéressantes pour la modélisation sont l'épaisseur (résiduelle) de la paroi, le module d'Young du matériau et le module du sol.

L'essai de vérinage interne permet de mesurer le module de la paroi et celui du sol.

10.2. La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste, d'une façon générale, comme d'autres méthodes numériques, à transformer les équations différentielles de la mécanique des milieux continus en un système linéaire fini d'équations algébriques par l'application d'un principe variationnel. Cette méthode connaît depuis une vingtaine d'années un développement considérable dans le domaine de la géomécanique, car elle permet l'analyse du comportement des structures, des terrains et de leurs interactions, par l'évaluation des champs de déformations et de contraintes des différents volumes de matériaux sous diverses sollicitations. Plus précisément, l'analyse par les éléments finis permet de modéliser les différents aspects essentiels suivants :

- l'hétérogénéité de comportement des matériaux constituant les terrains et les ouvrages (multicouches, ouvrages en maçonnerie) ;
- la géométrie complexe des ouvrages et de leur environnement ;
- le phénomène d'interaction entre les terrains et les structures ;
- les déformations induites à long terme par les excavations ou la mise en place de nouveaux matériaux (injection des terrains).

10.3. Caractéristiques recommandées du modèle aux éléments finis

10.3.1. Lois de comportement

Le chemisage/tubage est modélisé en élasticité linéaire. Le fluage du matériau est pris en compte par le biais d'un module à long terme.

Le sol est traité en élastoplasticité avec une loi de comportement simple pour la modélisation des actions permanentes (effet de la gravité et de la nappe) et en élasticité linéaire pour la modélisation des actions dynamiques dues au trafic.

La loi de comportement peut être le critère de Mohr-Coulomb (avec ou sans écrouissage) ou celui de Drucker-Prager, par exemple.

Les interfaces (sol/ouvrage d'accueil, coulis/coque) sont frottantes pour la modélisation des actions permanentes et collées (adhérence parfaite) pour la modélisation des actions dynamiques.

Les calculs pourront être menés directement en grand déplacement ou en petit déplacement avec des vérifications complémentaires de stabilité.

10.3.2. Maillage

Le chemisage pourra être modélisé avec des éléments de coque épaisse ou des éléments de massif. Le sol sera modélisé avec des éléments de massif bidimensionnels (à interpolation quadratique) ou tridimensionnels (figure 34).

Les symétries mécaniques et géométriques permettent généralement de modéliser les actions permanentes en déformation plane.

Les actions dues au trafic seront mieux modélisées avec un modèle tridimensionnel élastique linéaire avec des interfaces collées.

10.3.3. Déroulement des calculs

Les calculs sont réalisés avec les valeurs caractéristiques des actions. Les coefficients partiels seront appliqués aux effets des actions (contraintes, déformations) calculées.

On pourra appliquer l'ensemble des chargements permanents en une seule phase à l'ensemble ouvrage résiduel + coque.

Le coefficient de pression latérale des terres au repos peut jouer un rôle important pour certaines géométries, en particulier les ovoïdes. Il conviendra donc de faire varier ce coefficient.

10.4. Module de déformation du sol

Le module du sol joue un rôle important dans le comportement des structures enterrées.

En mécanique des sols, les modules sont rattachés aux essais qui permettent de les mesurer, module œdométrique E_{oed} , module pressiométrique E_M , module à la plaque E_{v2} , etc. Le module du sol n'est donc pas une caractéristique intrinsèque (comme l'angle de frottement interne), il dépend de nombreux paramètres comme l'amplitude de la déformation (0,01 % ou 1 %), la contrainte moyenne, l'indice des vides, la vitesse de la sollicitation, etc.

Dans les calculs qui font intervenir les charges permanentes (gravité et nappe), on recommande l'utilisation du module pressiométrique.

En l'absence d'essais *in situ* ou en laboratoire, on pourra utiliser les modules du *tableau III* en retenant les valeurs hautes qui correspondent au moins à un niveau de compactage q_4 .

Dans les calculs qui font intervenir des charges roulantes ou d'autres charges dynamiques (pression hydraulique interne, par exemple), on recommande l'utilisation de modules en petites déformations encore appelés modules de micro-déformation.

10.5. Contenu du rapport d'étude

Le rapport d'étude comprendra les sections suivantes :

• Hypothèses de calcul

- Ouvrage existant
 - Géométrie
 - Épaisseur résiduelle
 - Module d'Young
 - Coefficient de fluage ou module à long terme

- Chemisage-tubage
 - Géométrie
 - Épaisseur
 - Caractéristiques mécaniques (modules...)
- Sol
- Couverture
- Module, angle de frottement interne, cohésion
- Chaussée
- Épaisseur, module
- Nappe
 - Hauteur / fil de l'eau FE

• Modèle aux éléments finis

- Lois de comportement utilisées pour les matériaux
- Caractéristiques des interfaces
- Types d'éléments utilisés
- Caractéristiques du maillage avec des sorties graphiques

• Résultats des calculs

- Contraintes principales dans le chemisage-tubage
- Déplacements du chemisage-tubage avec calcul des déplacements relatifs par rapport au milieu du radier par exemple

Bibliographie

IN 3278. *Référentiel technique pour la réalisation des LGV*. Partie génie civil, tome III.

DWA-A 143-2 (2012) : *Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden*. Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserleitungen und -kanälen mit Lining- und Montageverfahren.

FALTER B. (1997) : « Structural analysis of sewer linings ». *Trenchless Technology Research* ; Vol. 11, n° 2 : 27-41.

EINSTEIN H., SCHWARTZ C.W. (1979) : « Simplified analysis for tunnel supports ». *Journal of the geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 105, GT4, pp. 499-518.

GUMBEL J.E. (1983) : *Analysis and design of buried flexible pipes*. Ph.D. dissertation. Department of Civil Engineering, University of Surrey, Guildford, England, 1983.

HOEG K. (1968) : « Stress against underground cylinder ». *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE* ; Vol. 94, SM4 : 833-858.

LAW M., MOORE I.D. (2007) : « Numerical modeling of tight fitting flexible liner in damaged sewer under earth loads ». *Tunnelling and Underground Space Technology* ; Vol. 22 : 655-665.

MÉNARD L., ROUSSEAU J. (1962) : « L'évaluation des tassements, tendances nouvelles ». *Sols Soils* ; n° 1, Paris.

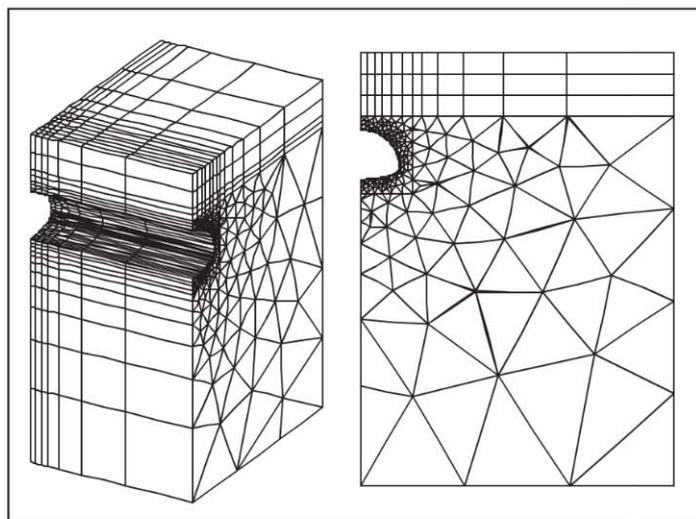


Figure 34. Exemple d'un maillage 3D (modélisation des charges de trafic) et 2D (modélisation des actions permanentes)

• Vérifications

Les vérifications sont les mêmes qu'avec la méthode analytique.

- Contraintes
- Allongements pour certains matériaux
- Déformations relatives (ovalisation verticale)

MOORE I.D. (1987) : « The elastic stability of shallow buried tubes ». *Geotechnique* 37 ; N° 2 : 151-161.

MOORE I.D. (2009) : « Specialised design considerations for liners in gravity flow pipes ». *Trenchless International* ; January 2009.

RERAU (2004) : *Restructuration des collecteurs visitables – Guide technique*. Tome 2. Édition Tec et Doc, Lavoisier.

SPASOJEVIC A.D., MAIR R.J., GUMBEL J.E. (2007) : « Centrifuge modelling of the effects of soil loading on flexible sewer liners ». *Geotechnique* ; 57, n° 4 : 331-341.

THÉPOT O. (2000A) : « Flambement d'une coque non circulaire plaquée contre une paroi ». *Revue Française de Génie Civil* ; Vol. 4, n° 1 : 81-107.

THÉPOT O. (2000b) : « A new design method for non-circular sewer linings ». *Tunnelling and Underground Space Technology* ; Vol. 15, n° 1 : 25-41.

THÉPOT O. (2001a) : « Structural design of oval-shaped sewer linings ». *Thin-Walled Structures* ; Vol. 39, n° 6 : 499-518.

THÉPOT O. (2001b) : « Contrôle du compactage des remblais de tranchées. Méthode par véringage interne de la conduite ». *Revue Française de Génie Civil* ; Vol. 5, n° 8 : 1241-1270.



2014

LYON
EUREXPO FRANCE
2 > 5 décembre 2014

26^e salon international des équipements,
des technologies et des services
de l'environnement

www.pollutec.com

Organisé par

 Reed Expositions

En association
avec



areassy.com

Annexe 1

Notations et symboles

Par convention, on adopte les appellations suivantes :

- l'ouvrage existant à réhabiliter est appelé « tuyau existant » ;
- la nouvelle canalisation mise en œuvre dans l'ouvrage existant est appelée « tuyau » ou « nouveau tuyau ».

• Classement alphabet romain, en majuscules

| Symbole | Paramètre | Unité |
|---------------------|---|-----------------------|
| A | Section transversale de la paroi du chemisage-tubage | mm ² /mm |
| C _{cc} | Coefficient d'accroissement de contrainte | – |
| D _{i,max} | Diamètre intérieur maximal du tuyau existant | mm |
| D _{i,min} | Diamètre intérieur minimal du tuyau existant | mm |
| D _e | Diamètre extérieur moyen du tuyau existant | mm |
| D _i | Diamètre intérieur moyen du tuyau existant | mm |
| E _{0,k} | Module en flexion caractéristique à court terme | MPa |
| EA | Rigidité axiale des parois structurées | N/mm |
| E _E | Module d'élasticité de l'environnement immédiat | MPa |
| EI | Rigidité de flexion transversale des parois structurées | N·mm ² /mm |
| E _{50,k} | Module en flexion à long terme caractéristique en milieu humide à 50 ans | MPa |
| E _{50,d} | Module en flexion à long terme de calcul | MPa |
| H | Hauteur de couverture au-dessus de la génératrice supérieure | m |
| H _d | Hauteur de calcul de la charge de terrain | m |
| H _{inj} | Hauteur de l'injection de coulis par rapport au fil d'eau | m |
| H _w | Hauteur de la nappe par rapport au fil d'eau | m |
| I | Inertie de flexion de la paroi du chemisage-tubage | mm ⁴ /mm |
| M | Moment fléchissant | N·mm/mm |
| M _{cr,we} | Moment fléchissant critique | N·mm/mm |
| M _d | Moment fléchissant de calcul | N·mm/mm |
| M _{ov} | Moment fléchissant dû à l'ovalisation différée du tuyau | N·mm/mm |
| M _{ov,d} | Valeur de calcul de M _{ov} | N·mm/mm |
| M _{we} | Moment fléchissant dû à la pression hydrostatique externe | N·mm/mm |
| M _{we,d} | Valeur de calcul de M _{we} | N·mm/mm |
| Ov ₀ | Ovalisation initiale du tuyau existant | % |
| Ov _L | Ovalisation différée du tuyau existant | % |
| P | Périmètre du chemisage-tubage | mm |
| S ₀ | Rigidité annulaire spécifique | N/m ² |
| S _{50,wet} | Rigidité annulaire spécifique à long terme en milieu humide | N/m ² |
| S _{50,d} | Rigidité annulaire à long terme de calcul | N/m ² |
| SDR | Rapport du diamètre extérieur nominal d _n sur son épaisseur nominale e _n (tubage) | – |
| SN | Classe de rigidité du tubage circulaire | kN/m ² |

• Classement alphabet romain, en minuscules

| Symbole | Paramètre | Unité |
|------------------|---|-------------------|
| d_n | Diamètre extérieur nominal (tubage) | mm |
| d_e | Diamètre extérieur moyen du chemisage-tubage | mm |
| d_i | Diamètre intérieur moyen du chemisage-tubage | mm |
| δ_o | Déformation du tubage avant application des charges | mm |
| e_a | Axe neutre de la paroi mesuré à partir de la face interne | mm |
| e | Épaisseur de dimensionnement du chemisage-tubage | mm |
| e_n | Épaisseur nominale du tubage | mm |
| g | Vide annulaire | mm |
| h | Épaisseur du tuyau existant | mm |
| k_2 | Coefficient de pression horizontale des terres | - |
| n_o | Nombre d'ondes de la figure de flambement du tuyau | - |
| ov_{inj} | Ovalisation du tubage après injection | % |
| $p_{cr,inj}$ | Pression critique de flambement sous l'action de l'injection | kN/m ² |
| $p_{cr,inj,d}$ | Valeur de calcul de $p_{cr,inj}$ | kN/m ² |
| $p_{cr,m}$ | Pression critique de flambement « multionde » sous l'action de la pression moyenne d'étreinte du sol et de la nappe | kN/m ² |
| $p_{cr,m,d}$ | Valeur de calcul de $p_{cr,m}$ | kN/m ² |
| $p_{cr,we}$ | Pression critique de flambement sous l'action d'une pression hydrostatique externe | kN/m ² |
| $p_{cr,we,d}$ | Valeur de calcul de $p_{cr,we}$ | kN/m ² |
| p_e | max (per + pep, pec) | kN/m ² |
| p_{ec} | Charges de chantier | kN/m ² |
| p_{ep} | Charges d'exploitation permanentes | kN/m ² |
| p_{er} | Charges d'exploitation roulantes | kN/m ² |
| p_h | Pression horizontale | kN/m ² |
| p_{inj} | Pression d'injection du coulis | kN/m ² |
| $p_{inj,d}$ | Valeur de calcul de p_{inj} | kN/m ² |
| p_r | Pression verticale des terres | kN/m ² |
| p_m | Pression moyenne d'étreinte | kN/m ² |
| $p_{m,d}$ | Valeur de calcul de p_m | kN/m ² |
| p_v | Pression verticale combinée | kN/m ² |
| $p_{v,d}$ | Valeur de calcul de p_v | kN/m ² |
| p_{we} | Pression hydrostatique extérieure | kN/m ² |
| $p_{we,d}$ | Valeur de calcul de p_{we} | kN/m ² |
| q_{ik}, q_{rk} | Charge uniformément répartie (système UDL) | kN/m ² |
| r | Rayon de dimensionnement du chemisage-tubage mesuré au niveau de l'axe neutre de la paroi | mm |
| r_e | Rayon extérieur moyen du chemisage-tubage (circulaire) | mm |
| r_i | Rayon intérieur moyen du chemisage-tubage (circulaire) | mm |
| r_{equ} | Rayon équivalent du chemisage-tubage | mm |
| s_L | Indice de rigidité relative environnement/tuyau à long terme | - |

• Classement alphabet grec

| Symbole | Paramètre | Unité |
|--------------------------|---|-------------------|
| α | Coefficient de fluage | – |
| δ_0 | Déformation initiale du tubage | m |
| δ_g | Vide annulaire réduit | – |
| $\epsilon_{fb,k}$ | Allongement caractéristique en flexion | % |
| $\epsilon_{fb,d}$ | Valeur de calcul de ϵ_R | % |
| ϵ_{LT} | Allongement admissible à long terme en milieu acide | % |
| ϵ_{we} | Allongement maximal de flexion dû à la nappe | % |
| γ | Poids volumique des terres | kN/m ³ |
| γ^{\wedge} | Poids volumique des terres déjaugées | kN/m ³ |
| γ_{coulis} | Poids volumique du coulis | kN/m ³ |
| γ_w | Poids volumique de l'eau | kN/m ³ |
| γ_G | Coefficient de sécurité partiel vis-à-vis des actions permanentes | – |
| γ_{FI} | Coefficients de sécurité vis-à-vis du flambement | – |
| γ_M | Coefficient de sécurité partiel sur le matériau | – |
| γ_{ME} | Coefficient de sécurité sur le module à long terme du matériau | – |
| $\kappa_{p,g}$ | Facteur de réduction de la pression de flambement dû au vide annulaire | – |
| $\kappa_{p,g \times 4r}$ | Facteur de réduction combiné (vide annulaire + ovalisation) de la pression de flambement dû au vide annulaire | – |
| ν_E | Coefficient de Poisson de l'environnement immédiat | – |
| ν | Coefficient de Poisson du chemisage-tubage | – |
| $\sigma_{fb,k}$ | Résistance caractéristique en flexion du chemisage-tubage | MPa |
| $\sigma_{fb,d}$ | Résistance de calcul du chemisage-tubage | MPa |
| $\sigma_{fb,L,k}$ | Valeur à long terme de $\sigma_{fb,k}$ | MPa |
| $\sigma_{fb,L,d}$ | Valeur de calcul de $\sigma_{fb,L,k}$ | MPa |
| σ_{we} | Contrainte maximale de flexion due à la nappe | MPa |
| $\sigma_{we,d}$ | Valeur de calcul de σ_{we} | MPa |

Annexe 2

Exemples de calculs

1. Chemisage circulaire

| Symbole | Unité | État d'accueil | | | | | | |
|--|---------------------|-------------------|-------------------------|------------|-------------------------|------------|-------------------------|------------|
| | | État I | | État II | | État III | | |
| | | Matériau | | Matériau | | Matériau | | |
| | | Feutre | Compo- site verre | Feutre | Compo- site verre | Feutre | Compo- site verre | |
| Conduite d'accueil | | | | | | | | |
| Matériau | - | - | Béton | Béton | Béton | Béton | Béton | Béton |
| État d'accueil | - | - | État I | État I | État II | État II | État III | État III |
| Diamètre intérieur | Di | mm | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Diamètre extérieur | De | mm | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 |
| Ovalisation initiale | Ov ₀ | % | 0,0 % | 0,0 % | 3,0 % | 3,0 % | 3,0 % | 3,0 % |
| Environnement | | | | | | | | |
| Groupe de sol | G | - | G3 | G3 | G3 | G3 | G3 | G3 |
| Module | E _E | MPa | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Coefficient de pression horizontale | k ₂ | - | - | - | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Poids volumique des terres | Y _E | kN/m ³ | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Poids volumique des terres déjaugées | Y' _E | kN/m ³ | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Couverture de sol/GS | H | m | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Hauteur nappe/fil de l'eau FE | H _w | m | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 |
| Classe de trafic | - | - | - | - | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Type de charge de trafic | - | - | - | - | TS | TS | TS | TS |
| Chemisage | | | | | | | | |
| Épaisseur de calcul | e | mm | 8,5 | 5 | 9,6 | 5,5 | 9,5 | 5,5 |
| Module caractéristique à court terme | E _{0,k} | MPa | 2 400 | 9 000 | 2 400 | 9 000 | 2 400 | 9 000 |
| Module caractéristique à long terme (50 ans) | E _{50,k} | MPa | 1 200 | 4 500 | 1 200 | 4 500 | 1 200 | 4 500 |
| Coefficient de Poisson | ν | - | 0,35 | 0,3 | 0,35 | 0,3 | 0,35 | 0,3 |
| Résistance caractéristique en flexion | σ _{fb,k} | MPa | 30 | 150 | 30 | 150 | 30 | 150 |
| Allongement admissible à long terme en milieu acide | ε _{i,T} | % | - | 0,45 % | - | 0,45 % | - | 0,45 % |
| Coefficient de sécurité matériau | Y _M | - | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Coefficient de réduction de la résistance à long terme | α _{fb} | - | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Résistance de calcul en flexion | σ _{fb,d} | MPa | 10 | 50 | 10 | 50 | 10 | 50 |
| Coefficient de sécurité du module de flexion (vérification au flambement) | Y _{ME} | - | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Profil de calcul | | | | | | | | |
| Rayon de calcul | r | mm | 245,8 | 247,5 | 245,2 | 247,2 | 245,3 | 247,3 |
| | r/e | - | 28,9 | 49,5 | 25,5 | 44,1 | 25,8 | 45,0 |
| Imperfections de forme | | | | | | | | |
| Ovalisation à 4 rotules | Ov0 | % | 0,0 % | 0,0 % | 3,0 % | 3,0 % | 3,0 % | 3,0 % |
| Vide annulaire relatif | g/r | % | 1,0 % | 1,0 % | 1,0 % | 1,0 % | 1,0 % | 1,0 % |
| Vide annulaire | g | mm | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Méplat | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Intrusion | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Actions | | | | | | | | |
| Pression hydrostatique extérieure | p _{we} | MPa | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,045 |
| Pression verticale due au poids des terres | p _{r,k} | kPa | - | - | 40,0 | 40,0 | 40,0 | 40,0 |
| Pression verticale due aux charges de trafic | p _{er,k} | kPa | - | - | 12,2 | 12,2 | 12,2 | 12,2 |
| Pression verticale due aux charges d'exploitation permanentes | p _{ep} | kPa | - | - | - | - | - | - |
| Pression verticale due aux charges de chantier | p _{ec} | kPa | - | - | - | - | - | - |
| Coefficients partiels sur les actions | | | | | | | | |
| Actions permanentes | g _G | - | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 |
| Nappe | g _G | - | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 |
| Charges de trafic | g _G | - | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 |
| Combinaison des actions et valeurs de calcul | | | | | | | | |
| Pression verticale | p _v | kPa | - | - | 52,2 | 52,2 | 52,2 | 52,2 |
| Pression verticale de calcul | p _{v,d} | kPa | - | - | 70,4 | 70,4 | 70,4 | 70,4 |
| Valeur de calcul de la pression hydrostatique extérieure | p _{we,d} | MPa | 0,061 | 0,061 | 0,061 | 0,061 | 0,061 | 0,061 |
| Justification sous l'action de la nappe pour les états I, II et III | | | | | | | | |
| Calcul des sollicitations | | | | | | | | |
| Vide annulaire réduit | δ _q | - | 1,66 | 3,17 | 1,43 | 2,82 | 1,45 | 2,82 |
| Ovalisation (4 rotules) réduite | δ _{4r} | - | 0 | 0 | 0,056 | 0,071 | 0,057 | 0,071 |
| Facteur de réduction combiné vide annulaire + ovalisation 4r | K _{p,gx4r} | - | 0,61 | 0,45 | 0,53 | 0,38 | 0,53 | 0,38 |

(Suite du tableau page suivante)

Chemisage circulaire (suite)

| | Symbole | Unité | État d'accueil | | | | | |
|---|--|-------------------|----------------|-------------------------|---------------|-------------------------|--------------|-------------------------|
| | | | État I | | État II | | État III | |
| | | | Matériau | | Matériau | | Matériau | |
| | | | Feutre | Compo- site verre | Feutre | Compo- site verre | Feutre | Compo- site verre |
| Pression de flambement | $p_{cr,we}$ | MPa | 0,112 | 0,092 | 0,126 | 0,095 | 0,123 | 0,095 |
| Pression de flambement de calcul | $p_{cr,we,d}$ | MPa | 0,074 | 0,061 | 0,084 | 0,063 | 0,082 | 0,063 |
| Moment fléchissant critique | $M_{cr,we}$ | mm·N/mm | 375,9 | 274,7 | 542,8 | 366,0 | 525,9 | 366,0 |
| Moment fléchissant | M_{we} | mm·N/mm | 82,5 | 76,8 | 103,2 | 98,0 | 103,4 | 98,0 |
| Moment fléchissant de calcul | $M_{we,d}$ | mm·N/mm | 120,1 | 116,9 | 147,6 | 147,8 | 148,3 | 147,8 |
| Contrainte de flexion | σ_{we} | MPa | 6,9 | 18,4 | 6,7 | 19,4 | 6,9 | 19,4 |
| Contrainte de flexion de calcul | $\sigma_{we,d}$ | MPa | 10,0 | 28,1 | 9,6 | 29,3 | 9,9 | 29,3 |
| Allongement | ϵ_{we} | % | - | 0,37% | - | 0,39% | - | 0,39% |
| Vérifications ELU (état limite ultime) | | | | | | | | |
| Stabilité à long terme | $p_{we,d}/p_{cr,we,d} \leq 1$ | | 0,82 | 1,00 | 0,72 | 0,96 | 0,74 | 0,96 |
| Résistance à long terme | $\sigma_{we,d}/\sigma_{fb,d} \leq 1$ | | 1,00 | 0,56 | 0,96 | 0,59 | 0,99 | 0,59 |
| Vérifications ELS (état limite de service) | | | | | | | | |
| Allongement à long terme pour les composites verre | $\epsilon_{we}/\epsilon_{LT} \leq 1$ | | - | 0,83 | - | 0,87 | - | 0,87 |
| Rigidité annulaire spécifique initiale | $SO > 0,25$ kPa $0,125/\alpha 50$ kPa | | 1,18 | 0,85 | 1,71 | 1,13 | 1,66 | 1,13 |
| Justifications pour l'état d'accueil II | | | | | | | | |
| Calcul des sollicitations | | | | | | | | |
| Ovalisation différée | OV_L | % | - | - | 1,02 % | 1,02 % | - | - |
| Ovalisation quasi permanente | OV_{qp} | % | - | - | 0,78 % | 0,78 % | - | - |
| Allongement différé | ϵ_{ov} | % | - | - | 0,09 % | 0,05 % | - | - |
| Allongement qp | $\epsilon_{ov,qp}$ | % | - | - | 0,07 % | 0,04 % | - | - |
| Moment fléchissant de calcul à court terme | M_{ov} | mm·N/mm | - | - | 49,2 | 33,0 | - | - |
| Moment fléchissant de calcul à long terme | $M_{ov,d}$ | mm·N/mm | - | - | 24,6 | 16,5 | - | - |
| Contrainte de flexion de calcul à court terme | σ_{ov} | MPa | - | - | 3,2 | 6,6 | - | - |
| Contrainte de flexion de calcul à long terme | $\sigma_{ov,d}$ | MPa | - | - | 1,6 | 3,3 | - | - |
| Vérifications ELU | | | | | | | | |
| Résistance à court terme | $\sigma_{ov,d}/\sigma_{fb,d} \leq 1$ | | - | - | 0,16 | 0,07 | - | - |
| Résistance à long terme | $\sigma_{ov,L,d}/\sigma_{fb,L,d} \leq 1$ | | - | - | 0,16 | 0,07 | - | - |
| Interaction I+II à long terme | $\left(\frac{\sigma_{we,d}}{\sigma_{fb,L,d}} + \left(\frac{\sigma_{ov,L,d}}{\sigma_{fb,L,d}}\right)^2\right) \leq 1$ | | - | - | 0,99 | 0,59 | - | - |
| Vérifications ELS | | | | | | | | |
| Ovalisation hors charges de trafic | $OV_0 + OV_{qp} \leq 10\%$ | | - | - | 3,78 % | 3,78 % | - | - |
| Ovalisation due aux charges de trafic | | | - | - | 0,24 % | 0,24 % | - | - |
| Allongement à long terme pour les composites verre I+II | $(\epsilon_{we} + \epsilon_{ov})/\epsilon_{LT} \leq 1$ | | - | - | - | 0,96 | - | - |
| Justifications pour l'état d'accueil III | | | | | | | | |
| Calcul des sollicitations | | | | | | | | |
| Raideur annulaire à long terme | S_L | kN/m ² | | | | | 0,83 | 0,57 |
| Raideur annulaire à long terme de calcul | $S_{L,d}$ | kN/m ² | | | | | 0,55 | 0,38 |
| Coefficient de rigidité relative à long terme | F_L | - | - | - | - | - | 414,76 | 605,66 |
| Ovalisation caractéristique | OV_k | % | | | | | 1,69 % | 1,71 % |
| Ovalisation quasi permanente | OV_{qp} | % | | | | | 1,45 % | 1,46 % |
| Allongement caractéristique | ϵ_{ov} | % | | | | | 0,10 % | 0,06 % |
| Allongement qp | $\epsilon_{ov,qp}$ | % | | | | | 0,09 % | 0,05 % |
| Contrainte de flexion de calcul à court terme | σ_{ov} | MPa | - | - | - | - | 1,39 | 2,92 |
| Contrainte de flexion de calcul à long terme | $\sigma_{ov,d}$ | MPa | - | - | - | - | 3,76 | 7,87 |
| Flambement multionde | | | | | | | | |
| Pression critique de flambement de calcul | $p_{cr,m,d}$ | MPa | - | - | - | - | 0,212 | 0,187 |
| Vérifications ELU (état limite ultime) | | | | | | | | |
| Stabilité flambement multionde | $(p_{we,d} + p_{v,d})/p_{cr,m,d} \leq 1$ | | - | - | - | - | 0,62 | 0,70 |
| Résistance à court terme | $\sigma_{ov,d}/\sigma_{fb,d} \leq 1$ | | - | - | - | - | 0,19 | 0,08 |
| Résistance à long terme | $\sigma_{ov,L,d}/\sigma_{fb,L,d} \leq 1$ | | - | - | - | - | 0,19 | 0,08 |
| Vérifications ELS (état limite de service) | | | | | | | | |
| Ovalisation hors charges de trafic | $OV_0 + OV_{qp} \leq 10\%$ | | - | - | - | - | 4,45% | 4,46 % |
| Ovalisation due aux charges de trafic | | | - | - | - | - | 0,24% | 0,25 % |
| Allongement à long terme pour les composites verre | $\epsilon_{ov}/\epsilon_{LT} \leq 1$ | | - | - | - | - | - | 0,11 |

2. Tubages circulaires (injection du coulis)

| État d'accueil | Symbole | Unité | État III |
|---|---------------------|-------------------|-----------------------------|
| Géométrie | | | |
| Matériau | | | Circulaire PE100 |
| Conduite d'accueil | | | |
| Matériau | | - | Béton |
| État d'accueil | | - | État III |
| Diamètre intérieur | Di | mm | 500 |
| Diamètre extérieur | De | mm | 600 |
| Environnement | | | |
| Groupe de sol | G | - | G3 |
| Module | E _E | MPa | 2,5 |
| Coefficient de pression horizontale | k ₂ | - | 0,2 |
| Poids volumique des terres | Y _E | kN/m ³ | 20 |
| Poids volumique des terres déjaugées | Y' _E | kN/m ³ | 10 |
| Couverture de sol/GS | H | m | 4 |
| Hauteur nappe/fil de l'eau FE | H _w | m | 4,5 |
| Classe de trafic | | | 2 |
| Type de charge de trafic | - | - | TS |
| Tubage | | | |
| Diamètre extérieur | de | mm | 450 |
| Épaisseur de calcul | e | mm | 26,7 |
| Module caractéristique à court terme | E _{0,k} | MPa | 950 |
| Coefficient de fluage | | | 5 |
| Module caractéristique à long terme (50 ans) | E _{50,k} | MPa | 190 |
| Coefficient de Poisson | ν | - | 0,3 |
| Résistance caractéristique en flexion à court terme | σ _{fb,k} | MPa | 20 |
| Rapport résistance long terme/court terme | φ | - | 0,7 |
| Résistance caractéristique en flexion à long terme | σ _{fb,L,k} | MPa | 14 |
| Allongement admissible à long terme en milieu acide | ε _{LT} | % | |
| Coefficient de sécurité matériau | Y _M | - | 1,2 |
| Résistance de calcul en flexion à long terme | σ _{fb,L,d} | MPa | 16,7 |
| Coefficient de sécurité du module de flexion (flambement) | Y _{MF} | - | 1,5 |
| Actions | | | |
| Poids volumique du coulis | γ _c | kN/m ³ | 16 |
| Hauteur d'injection/fil de l'eau FE | H _{inj} | m | 2 |
| Pression d'injection du coulis | p _{inj} | MPa | 0,032 |
| Pression d'eau intérieure | p _w | MPa | 0,02 |
| Pression hydrostatique extérieure | p _{we} | MPa | 0,045 |
| Pression verticale due au poids des terres | p _{r,k} | kPa | 40,0 |
| Pression verticale due aux charges de trafic | p _{er,k} | kPa | 12,2 |
| Pression verticale due aux charges d'exploitation permanentes | p _{ep} | kPa | |
| Pression verticale due aux charges de chantier | p _{ec} | kPa | |
| Coefficients partiels sur les actions | | | |
| Actions permanentes | g _G | - | 1,35 |
| Nappe | g _G | - | 1,35 |
| Charges de trafic | g _Q | - | 1,35 |
| Pression d'injection | γ _{G,inj} | MPa | 1,5 |

(Suite du tableau page suivante)

2. Tubages circulaires (injection du coulis) (suite)

| État d'accueil | Symbole | Unité | État III |
|--|-----------------|-------------------|---------------|
| Combinaison des actions et valeurs de calcul | | | |
| Pression de calcul du coulis | $p_{inj,d}$ | MPa | 0,045 |
| Pression verticale | p_v | kPa | 52,2 |
| Pression verticale de calcul | $p_{v,d}$ | kPa | 70,4 |
| Valeur de calcul de la pression hydrostatique extérieure | $p_{we,d}$ | MPa | 0,061 |
| Profil de calcul | | | |
| Rayon de calcul | r | mm | 211,7 |
| | r/e | - | 7,9 |
| Imperfections de forme | | | |
| Ovalisation initiale | | | 1,0% |
| Justification sous l'action de la pression d'injection du coulis | | | |
| Pression critique de flambement | $p_{cr,inj}$ | MPa | 0,105 |
| Pression de flambement de calcul | $p_{cr,inj,d}$ | | 0,070 |
| Vérifications ELU (état limite ultime) | | | |
| Stabilité au flambement | | | 0,69 |
| Vérification ELS (état limite de service) | | | |
| Ovalisation après injection < 5% | | | 1,83 % |
| Justification sous l'action de la nappe pour les états I, II et III | | | |
| Calcul des sollicitations | | | |
| Facteur de réduction combiné vide annulaire + ovalisation 4r | $k_{p,gx4r}$ | - | 0,91 |
| Pression de flambement | $p_{cr,we}$ | MPa | 0,434 |
| Pression de flambement de calcul | $p_{cr,we,d}$ | MPa | 0,289 |
| Moment fléchissant critique | $M_{cr,we}$ | mm·N/mm | 2 065,5 |
| Moment fléchissant | M_{we} | mm·N/mm | 107,7 |
| Moment fléchissant de calcul | $M_{we,d}$ | mm·N/mm | 146,0 |
| Contrainte de flexion | σ_{we} | MPa | 0,9 |
| Contrainte de flexion de calcul | $\sigma_{we,d}$ | MPa | 1,2 |
| Allongement | ϵ_{we} | % | - |
| Vérifications ELU | | | |
| Stabilité à long terme | | | 0,21 |
| Résistance à long terme | | | 0,07 |
| Vérifications ELS | | | |
| Allongement à long terme pour les composites verre | | | - |
| Justifications pour l'état d'accueil III | | | |
| Calcul des sollicitations | | | |
| Raideur annulaire à long terme (LT) | S_L | kN/m ² | 4,37 |
| Raideur annulaire à LT de calcul | $S_{L,d}$ | kN/m ² | 2,91 |
| Coefficient de rigidité relative à LT | F_L | - | 78,65 |
| Ovalisation caractéristique | Ov_k | % | 1,51 % |
| Ovalisation quasi permanente | $Ov_{k,qp}$ | % | 1,27 % |
| Allongement à LT | ϵ_L | % | 0,29 % |
| Allongement qp | σ_d | % | 0,25 % |
| Contrainte de calcul court terme | σ_d | MPa | 4,6 |
| Contrainte de calcul long terme | σ_d | MPa | 0,92 |
| Flambement multionde | | | |
| Pression critique de flambement de calcul | $p_{cr,inj,d}$ | MPa | 0,370 |
| Vérifications ELU | | | |
| Stabilité flambement multiondes | | | 0,35 |
| Résistance court terme | | | 0,28 |
| Résistance long terme | | | 0,06 |
| Vérifications ELS | | | |
| Ovalisation hors charges de trafic | | | 3,10 % |
| Ovalisation due aux charges de trafic | | | 0,24 % |

3. Chemisages non circulaires critiques

| Géométrie | | | Ovoïde 3x2 900x600 | | | | T100 NF P16-401 625 | | | |
|--|--|--|---|------|-----------|-----------|---------------------------|-----------|-----------------|-----------|
| | | | Symbole | | Unité | | Matériau | | Matériau | |
| | | | | | Feutre | | Composite verre | | Composite verre | |
| Conduite d'accueil | | | | | Béton | Béton | Béton | Béton | Béton | Béton |
| Matériau | | | - | | Béton | Béton | Béton | Béton | Béton | Béton |
| État d'accueil | | | - | | État I/II | État I/II | État I/II | État I/II | État I/II | État I/II |
| Hauteur | | | H | mm | 900 | 900 | 900 | 900 | 1 000 | 1 000 |
| Largeur | | | L | mm | 600 | 600 | 600 | 600 | 625 | 625 |
| Rayon du piédroit (ovoïde) | | | R | mm | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 |
| Angle du piédroit | | | | ° | 36,87° | 36,87° | 36,87° | 36,87° | 48° | 48° |
| Périmètre | | | P | mm | 2 379 | 2 379 | 2 379 | 2 379 | 2 640 | 2 640 |
| Environnement | | | | | | | | | | |
| Hauteur nappe/fil de l'eau FE | | | H _w | m | 1,5 | 4 | 1,5 | 4 | 1,5 | 4 |
| Chemisage | | | | | | | | | | |
| Épaisseur de calcul | | | e | mm | 14,5 | 21 | 9,5 | 13 | 10 | 13,5 |
| Module caractéristique à court terme | | | E _{0,k} | MPa | 2 400 | 2 400 | 9 000 | 9 000 | 9 000 | 9 000 |
| Module caractéristique à long terme (50 ans) | | | E _{50,k} | MPa | 1 200 | 1 200 | 4 500 | 4 500 | 4 500 | 4 500 |
| Coefficient de Poisson | | | ν | - | 0,35 | 0,35 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Résistance caractéristique en flexion à court terme | | | σ _{fb,k} | MPa | 30 | 30 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Résistance caractéristique en flexion à long terme | | | σ _{fb,L,k} | MPa | 15 | 15 | 75 | 75 | 75 | 75 |
| Allongement admissible à long terme en milieu acide | | | ε _{LT} | % | | | 0,45 % | 0,45 % | 0,45 % | 0,45 % |
| Coefficient de sécurité matériau | | | γ _M | - | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Résistance de calcul en flexion à long terme | | | σ _{fb,L,d} | MPa | 10 | 10 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Coefficient de sécurité flambement nappe | | | γ _{MF} | - | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Profil de calcul | | | | | | | | | | |
| Périmètre | | | P | mm | 2 333 | 2 313 | 2 349 | 2 338 | 2 609 | 2 598 |
| Rayon équivalent | | | Req | mm | 371,3 | 368,1 | 373,8 | 372,1 | 415,2 | 413,4 |
| Rayon de courbure des piédroits (fibre neutre) | | | r | mm | 892,75 | 889,5 | 895,25 | 893,5 | 895 | 893,25 |
| Imperfections de forme | | | | | | | | | | |
| Vide annulaire relatif | | | g/r | % | 1,0 % | 1,0 % | 1,0 % | 1,0 % | 1,0 % | 1,0 % |
| Vide annulaire | | | g | mm | 3,7 | 3,7 | 3,7 | 3,7 | 4,2 | 4,1 |
| Actions | | | | | | | | | | |
| Pression hydrostatique extérieure | | | p _{we} | MPa | 0,015 | 0,04 | 0,015 | 0,04 | 0,015 | 0,04 |
| Coefficient partiel | | | g _G | - | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 |
| Valeur de calcul de la pression hydrostatique extérieure | | | p _{we,d} | MPa | 0,020 | 0,054 | 0,020 | 0,054 | 0,020 | 0,054 |
| Justification sous l'action de la nappe pour l'état d'accueil I | | | | | | | | | | |
| Calcul des sollicitations | | | | | | | | | | |
| Vide annulaire réduit | | | δ _g | - | 2,90 | 1,85 | 4,83 | 3,31 | 4,74 | 3,24 |
| Facteur de réduction dû au vide annulaire | | | k _{p,g} | - | 0,48 | 0,59 | 0,35 | 0,44 | 0,36 | 0,45 |
| Pression critique de flambement | | | p _{cr,we} | MPa | 0,031 | 0,087 | 0,032 | 0,081 | 0,035 | 0,089 |
| Pression critique de flambement de calcul | | | p _{cr,we,d} | MPa | 0,021 | 0,058 | 0,022 | 0,054 | 0,023 | 0,059 |
| Moment fléchissant critique | | | M _{cr,we} | mm·N | 513,7 | 1 566,2 | 520,9 | 1 337,5 | 607,8 | 1 524,3 |
| Moment fléchissant | | | M _{we} | mm·N | 141,9 | 403,9 | 135,7 | 374,1 | 142,9 | 383,1 |
| Moment fléchissant de calcul | | | M _{we,d} | mm·N | 215,4 | 604,4 | 203,5 | 569,4 | 210,2 | 570,3 |
| Contrainte de flexion | | | σ _{we} | MPa | 4,1 | 5,5 | 9,0 | 13,3 | 8,6 | 12,6 |
| Contrainte de flexion de calcul | | | σ _{we,d} | MPa | 6,1 | 8,2 | 13,5 | 20,2 | 12,6 | 18,8 |
| Allongement | | | ε _{we} | % | - | - | 0,18% | 0,27% | 0,17% | 0,26% |
| Vérifications ELU (état limite ultime) | | | | | | | | | | |
| Stabilité à long terme | | | p _{we,d} /p _{cr,we,d} ≤ 1 | | 0,99 | 0,93 | 0,94 | 1,00 | 0,87 | 0,91 |
| Résistance à long terme | | | σ _{we,d} /σ _{fb,L,d} ≤ 1 | | 0,61 | 0,82 | 0,27 | 0,40 | 0,25 | 0,38 |
| Vérifications ELS (état limite de service) | | | | | | | | | | |
| Allongement à long terme pour les composites verre | | | ε _{we} /ε _{LT} ≤ 1 | | - | - | 0,41 | 0,60 | 0,39 | 0,59 |

4. Chemisages non circulaires sous-critiques

| Géométrie | | | | |
|--|--|--------------|------------------------|-------------|
| | Symbole | Unité | Composite verre | |
| Matériau | | | | |
| Conduite d'accueil | | | | |
| Matériau | | - | Béton | Béton |
| État d'accueil | | - | État I/II | État I/II |
| Hauteur | H | mm | 1 000 | 1 000 |
| Largeur | B | mm | 600 | 600 |
| Rayon de la voûte | R2 | mm | 300 | 300 |
| Rayon du raccord radier/piédroit | R1 | mm | 100 | 100 |
| Longueur droite du piédroit | L | mm | 572 | 572 |
| Périmètre | P | mm | 2 644 | 2 644 |
| Environnement | | | | |
| Hauteur nappe/FE | H_w | m | 1,5 | 3,5 |
| Chemisage | | | | |
| Épaisseur de calcul | e | mm | 15,5 | 20,5 |
| Module caractéristique à court terme | $E_{0,k}$ | MPa | 9 000 | 9 000 |
| Module caractéristique à long terme (50 ans) | $E_{50,k}$ | MPa | 4 500 | 4 500 |
| Coefficient de Poisson | ν | - | 0,3 | 0,3 |
| Résistance caractéristique en flexion à court terme | $\sigma_{fb,k}$ | MPa | 150 | 150 |
| Rapport résistance long terme/court terme | φ | - | 0,5 | 0,5 |
| Résistance caractéristique en flexion à long terme | $\sigma_{fb,l,k}$ | MPa | 75 | 75 |
| Coefficient de sécurité matériau | γ_M | - | 1,5 | 1,5 |
| Résistance de calcul en flexion à long terme | $\sigma_{fb,l,d}$ | MPa | 50 | 50 |
| Allongement admissible à long terme en milieu acide | ε_{LT} | % | 0,45 % | 0,45 % |
| Flèche admissible à long terme | d_L | mm | 10 | 10 |
| Profil de calcul au niveau de la fibre neutre | | | | |
| Rayon de la voûte | r_2 | mm | 292,25 | 289,75 |
| Rayon du raccord piédroit/radier | r_1 | mm | 92,25 | 89,75 |
| Longueur droite du piédroit | L | mm | 572 | 572 |
| Périmètre | p | mm | 2 595,3 | 2 579,6 |
| Actions | | | | |
| Pression hydrostatique extérieure | p_{we} | MPa | 0,015 | 0,035 |
| Coefficient partiel | g_G | - | 1,35 | 1,35 |
| Valeur de calcul de la pression hydrostatique extérieure | $p_{we,d}$ | MPa | 0,020 | 0,047 |
| Justification sous l'action de la nappe pour l'état d'accueil I | | | | |
| Calcul des sollicitations | | | | |
| Angle de décollement en radier | α_1 | ° | 47,2° | 52,3° |
| Angle de décollement en voûte | α_2 | ° | 26,5° | 29,1° |
| Pression à la flèche admissible | p | MPa | 0,0164 | 0,0365 |
| Contrainte à la flèche admissible | σ | MPa | 12,33 | 15,58 |
| Allongement à la flèche admissible | ε | % | 0,25% | 0,32% |
| Contrainte à la pression de calcul | $\sigma_{we,d}$ | MPa | 16,9 | 22,1 |
| Vérifications ELU (état limite ultime) | | | | |
| Résistance à long terme | $\sigma_{we,d}/\sigma_{fb,l,d} \leq 1$ | | 0,34 | 0,44 |
| Vérifications ELS (état limite de service) | | | | |
| Flèche à long terme | $p_{we}/p \leq 1$ | | 0,91 | 0,96 |
| Allongement à long terme pour les composites verre | $\varepsilon/\varepsilon_{LT} \leq 1$ | | 0,56 | 0,71 |