

Conception et dimensionnement des ouvrages circulaires

Conception and Design of circular retaining walls

Philippe LEGRAND^{7*}, Judith BERNIS¹, Martin CAHN², Luis CARPINTEIRO³, André DE GOYON⁴, Hossein ESLAMI⁵, Maxime FONTY⁶, Nicolas GROSDIDIER⁶, Julien HABERT², François LOUVEL⁸, Mathieu ROMAGON⁷

*1 SEFI INTRAFOR, Grigny, France, 2 TERRASOL, Paris, France, 3 GINGER CEBTP, Elancourt, France,
4 EIFFAGE Génie Civil, Vélizy Villacoublay, France, 5 FAYAT FONDATIONS, Grigny, France
6 SOLETANCHE BACHY, Rueil Malmaison, France, 7 NGE FONDATIONS, Saint Priest, France
8 SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS, Nanterre, France*

**plegrand@ngefondations.fr*

RESUME : Dans le cadre de la révision de la norme NF P94-282 traitant de la justification des écrans de soutènement associée à la 2^{ème} génération des Eurocodes, un groupe de travail s'est réuni pour établir une annexe informative sur les dispositions particulières pour les écrans circulaires.

Dans la continuité des travaux effectués dans le cadre des recommandations AFTES sur les puits superficiels, l'objet de l'annexe précitée est de présenter les principes de conception des ouvrages de soutènements circulaires et d'attirer l'attention des lecteurs sur les risques associés à ces ouvrages autostables.

Le domaine d'application de l'annexe concerne uniquement les soutènements et ouvrages dont la typologie permet le développement d'un effet d'anneau garantissant leur stabilité.

Le calcul de ces ouvrages est basé sur la mobilisation de leur rigidité cylindrique sous l'effet d'une poussée périmétrique. L'annexe présente les méthodes de calcul et propose en particulier une approche pour définir les différents anneaux inscrits à retenir pour le calcul des sollicitations dans l'épaisseur du soutènement.

L'annexe précise également les principes à retenir pour effectuer les vérifications structurales des ouvrages sous les différents états limites, pour étudier l'influence des ouvertures sur la stabilité structurale et pour les autres vérifications géotechniques permettant de justifier la stabilité de l'ouvrage (défaut de butée, hydraulique, etc.).

Par ailleurs, une analyse a été menée pour évaluer la sensibilité du dimensionnement de ces ouvrages vis-à-vis des tolérances de déviation à partir de différents retours d'expérience.

ABSTRACT: As part of the revision of the French standard NF P94-282 "Retaining walls" for the second generation of the Eurocodes, a working group was established to develop an informative annex to define specifications to design circular walls and to identify risks associated with these self-supporting structures.

The AFTES recommendations for shallow shafts already present specifications which are completed with different publications and studies carried out.

The scope of the annex applies only to retaining structures whose typology allows the development of a ring effect.

The calculation of these structures is based on developing cylindrical stiffness. The annex presents calculation methods and, in particular, proposes an approach for defining the various rings to be considered when calculating stresses within the thickness of the retaining structure.

The annex also specifies the principles to be applied for structural verification, for studying the influence of openings on structural stability, and for other geotechnical verifications required to justify the stability of the structure.

Based on various feedback from experience, a study was conducted to assess the sensitivity of the design of these structures to deviation tolerances,

Mots-clés: Ouvrages circulaires ; effet d'anneau ; soutènement ; rigidité cylindrique ; déviations.

1 PREAMBULE

De multiples projets (bassins d'orage, puits d'accès aux ouvrages souterrains, ...) conduisent à retenir une conception d'ouvrages circulaires enterrés au regard

des gains économiques apportés par la justification technique de ces ouvrages.

Conformément à la NF P94-282, le comportement d'une paroi circulaire peut être assimilé à celui d'un écran continu plan uniforme bénéficiant d'un appui continu élastique constitué d'anneaux horizontaux.

Pour juger de cela, la continuité d'appui doit être vérifiée et doit rester compatible avec les tolérances d'exécution des éléments verticaux de la paroi.

Les dispositions et méthodes de dimensionnement pour la prise en compte d'un effet de voute, ne sont pas détaillées dans la norme mais différentes publications en font état :

- « Quelques considérations pratiques autour de la justification géotechnique des puits circulaires », (Cahn et al. 2022) ;
- Recommandations AFTES n°GT28R2F1 « Puits superficiels » publiées en mai 2023

Pour compléter et préciser le texte normatif avec une annexe informative sur les dispositions particulières pour les écrans circulaires, un groupe de travail s'est réuni dans le cadre de la révision de la norme NF P94-282 associée à la 2ème génération des Eurocodes. Le présent article vient en complément des publications existantes afin de préciser les choix effectués dans le cadre du groupe de travail.

Dans la continuité du texte normatif actuel, il sera fait état des propositions du groupe de travail en particulier pour le calcul de la rigidité cylindrique, faisant intervenir l'épaisseur du soutènement, et les vérifications des contraintes annulaires. Une attention particulière reste portée aux tolérances d'exécution à respecter (déviations en particulier) et une discussion sur les conséquences d'une perte de rigidité (liée aux effets d'une déviation, ou à un percement du soutènement) est proposée. Enfin quelques exemples de traitement de chargements dissymétriques sont présentés.

2 EFFET D'ANNEAU ET VERIFICATIONS ASSOCIEES

Comme présenté dans la recommandation AFTES, les pressions s'appliquant sur le soutènement circulaire sont reprises pour une partie importante par l'effet voûte, comprimant l'anneau de soutènement. Les ouvrages circulaires sont rigides et les déformations sont faibles sauf cas particuliers. Les enjeux du dimensionnement portent sur la stabilité de l'anneau qui assure la tenue de l'ouvrage.

La définition de l'épaisseur de l'anneau inscrit constitue une hypothèse forte de l'approche tant pour le calcul de la rigidité cylindrique de l'ouvrage que pour le calcul de contrainte annulaire transisant dans l'anneau (ou contrainte orthoradiale). Le choix d'une épaisseur de l'anneau majorée ou minorée pour le dimensionnement a des effets antagonistes en termes de déformation ou de contrainte. Du fait des tolérances d'exécution, une réduction de l'épaisseur d'anneau en compression accentuera la déformation (et la flexion

verticale) mais minorera la contrainte annulaire. A l'inverse, en l'absence de déviations, l'épaisseur reste conservée et les contraintes annulaires sont maximales.

L'approche normative doit donc rester prudente tant en déformation qu'en contrainte pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

2.1 Calcul de la rigidité cylindrique

Le groupe de travail a proposé de retenir de façon générale pour le calcul de la rigidité cylindrique (R_{cyl}) l'épaisseur inscrite (e_i) de l'anneau sans tenir compte de la possible déviation. Il est ainsi proposé :

$$R_{cyl} = \frac{e_i E_{b\acute{e}ton}}{R_{moy}^2} \quad (1)$$

Où $E_{b\acute{e}ton}$ est le module d'Young du béton, R_{moy} est le rayon de l'ouvrage à l'axe théorique du soutènement (Rayon intérieur + demi-épaisseur de l'anneau).

Retenir la rigidité de l'anneau inscrit sans déviation reste prudent car cette hypothèse permet de ne pas sous-estimer l'effort (et donc la contrainte annulaire) pour les vérifications structurelles à mener afin de justifier la stabilité de l'ouvrage. Elle peut conduire à sous-estimer légèrement les déplacements de l'ouvrage. Cependant, comme le montre un exemple présenté sur la Figure 1, cette sous-estimation reste faible (quelques millimètres) et ce n'est généralement pas le critère dimensionnant de ces ouvrages. En l'absence d'ouverture (pour lesquelles les moments de flexion sont appréciés par annulation de la rigidité cylindrique dans la démarche calculatoire courante, voir §3.2), le dimensionnement béton armé des parois circulaires conduit généralement à ne retenir que le ferrailage minimum prescrit à l'EN 1992. Dans certaines configurations, le dimensionnement peut conduire à retenir un béton non armé.

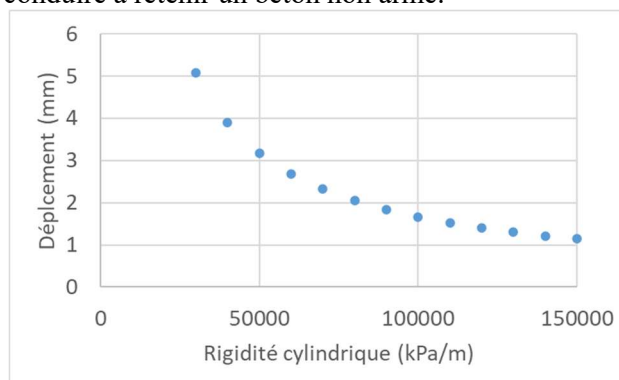


Figure 1. Exemple illustrant l'évolution des déplacements du soutènement en fonction de la rigidité cylindrique

Retenir la rigidité de l'anneau inscrit sans déviation est également plus réaliste au regard de l'épaisseur effectivement réduite sur le périmètre de l'ouvrage. Comme illustré sur la Figure 2, l'anneau conserve majoritairement son épaisseur initiale e_i au minimum.

En effet, malgré les déviations, l'épaisseur réelle du soutènement reste globalement constante et l'épaisseur de l'anneau inscrit n'est réduite par la déviation que très localement, au niveau des joints ou des remordus entre pieux.

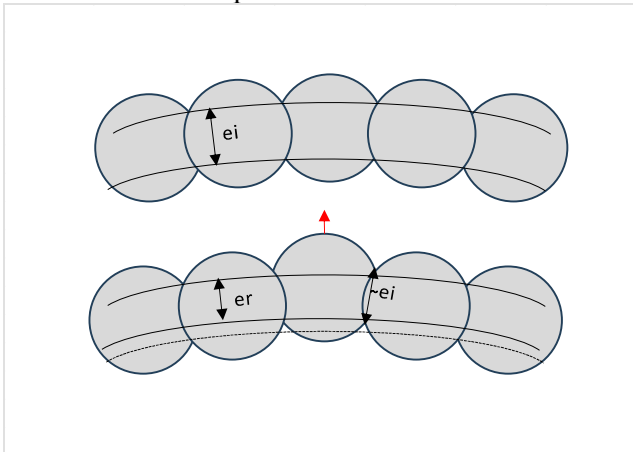


Figure 2. Exemple de réduction d'épaisseur de l'anneau inscrit en fonction de la déviation du pieu

Enfin, prendre en compte la déviation pour déterminer la rigidité cylindrique pose également des questionnements de représentativité des modélisations qu'il conviendrait de définir dans les choix de conception. En effet, la rigidité de l'ouvrage est affectée localement au niveau de l'élément dévié et est variable avec la profondeur.

2.2 Vérification des contraintes annulaires

Comme indiqué précédemment, pour ne pas sous-estimer la sollicitation, l'effort annulaire reste calculé avec une rigidité cylindrique n'intégrant pas les déviations. La contrainte associée à cet effort est en revanche calculée à l'ELU avec l'épaisseur résiduelle (e_r) intégrant les tolérances définies au projet (la plus faible surface de contact après déviation). Même ponctuellement, l'effort doit effectivement transiter au droit de l'épaisseur réduite. La contrainte annulaire à l'ELU est comparée à la résistance de dimensionnement du béton (f_{cd}). Cette approche prudente est justifiée par la nécessité de vérifier la continuité de l'effort d'anneau sur tout le pourtour de la section pour vérifier la stabilité de l'ouvrage.

Concernant les vérifications ELS, le calcul de contrainte (σ_{ELS}) est effectué en ne prenant pas en compte les tolérances dans le calcul de l'épaisseur de l'anneau. Cette contrainte reste toutefois à vérifier avec la contrainte moyenne admissible par le béton (et non la contrainte maximale) fixée à $0,35.f_{ck}^*$ conformément à la valeur retenue pour la résistance caractéristique f_{ck}^* du béton des éléments de fondations par les projets de normes d'application nationale françaises de la nouvelle génération

d'Eurocodes. Les vérifications des contraintes sont effectuées selon une approche prudente en retenant le rayon extérieur de l'anneau (R_{ext}). Finalement les vérifications suivantes sont faites :

$$\begin{cases} \sigma_{ELU} = 1,35 \cdot \frac{R_{ext}}{e_r} \cdot P_{annulaire} < f_{cd} \\ \sigma_{ELS} = \frac{R_{ext}}{e_t} \cdot P_{annulaire} < 0,35 \cdot f_{ck}^* \end{cases} \quad (2)$$

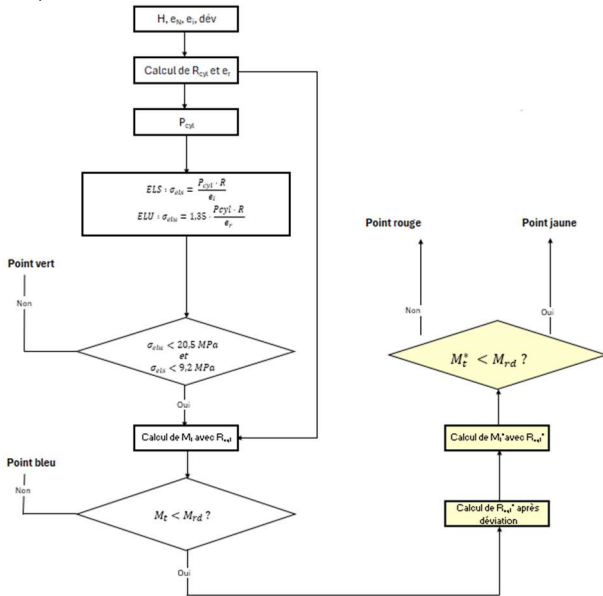
3 ETUDE COMPLEMENTAIRE DES CONSEQUENCES D'UNE PERTE DE RIGIDITE SUR LE FERRAILLAGE DES PAROIS

3.1 Influence d'une diminution de la rigidité cylindrique sur les moments de flexion

Même si l'enjeu de la conception est de ne pas sous-estimer l'effort d'anneau par un calcul dans lequel la rigidité cylindrique serait réduite, le groupe de travail s'est posé la question de savoir quelles influences une baisse de rigidité pouvait avoir sur les moments de flexions verticales (d'axe horizontal). En effet, comme illustré sur la Figure 1, une diminution de la rigidité cylindrique conduira à une augmentation progressive des déplacements et de la flexion verticale. Une étude de sensibilité tente alors de répondre à la question suivante : si une déviation conduisait à réduire la rigidité cylindrique sur l'ensemble de l'ouvrage, le ferrailage minimum mis en place serait-il toujours suffisant compte tenu de l'augmentation des efforts de flexion, ou bien encore, le moment de flexion reste-t-il inférieur au moment de première fissuration ?

Pour ce faire un calcul paramétrique a été réalisé pour différents rayons et hauteurs d'ouvrage. Le moment de flexion, obtenu sur le modèle dans lequel la rigidité cylindrique est calculée sur la base de l'épaisseur résiduelle (après déviations potentielles), est comparé au moment de première fissuration du béton : $M_t / M_{rd} > 1$ avec M_{rd} le moment de première fissuration d'une section rectangulaire égal à $f_{ctm} \cdot \frac{e_N^2}{6}$ où f_{ctm} (MPa) est la valeur moyenne de la résistance en traction directe du béton et e_N (m) est l'épaisseur nominale de parois. La figure 3 montre que les configurations pour lesquels le moment de flexion deviendrait critique, sont limités (points bleus et rouges, voir logigramme) et sont contenus dans un plan tel que $\frac{H}{\sqrt{e_N}} \geq \lambda \sqrt{R_{cyl}^*}$. où H est la hauteur excavée, e_N est l'épaisseur nominale, R_{cyl}^* est une rigidité calculée sur la base d'une épaisseur résiduelle et λ est une constante. Cette expression est issue de la résolution d'un modèle type Winkler utilisé ici pour calculer le moment M_t d'une poutre appuyée

continument (ici par l'anneau) et soumis à un chargement triangulaire (les poussées du terrain et d'eau).



car celui aujourd'hui proposé, s'il a l'avantage d'être simple, demeure trop sévère au regard de nombreux ouvrages réalisés avec satisfaction ces dernières années et n'ayant pas nécessité cette procédure complémentaire. Les ouvrages réalisés récemment par deux entreprises, à la suite d'une procédure telle que décrit en §2 sont reportés sur la Figure 4 dans un plan $\frac{H}{\sqrt{eN}}$ vs R_{cyl} (pour les parois moulées) et dans un plan $\frac{H}{e_i^*}$ versus R/e_i^* où e_i^* est déduite de l'épaisseur inscrite e_i et du critère de déviation (pour les parois moulées et pieux sécants)

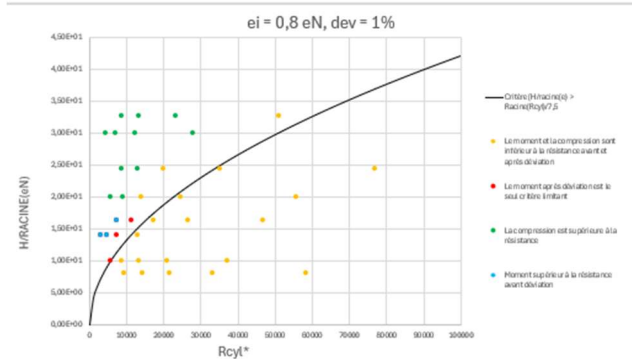
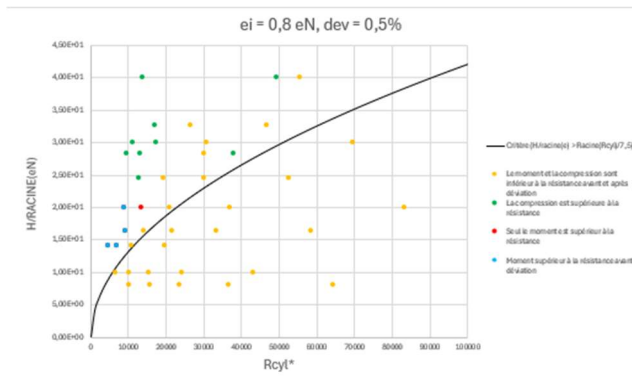
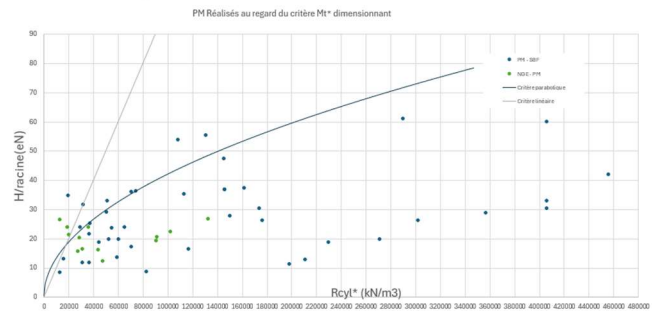


Figure 3.. Résultats des calculs paramétriques menés

A ce stade, le projet de norme propose un critère plus simple (fonction des dimensions R/e_i , H/e_i , et de la déviation prise en compte), à partir duquel il pourrait être nécessaire de procéder à une modélisation complémentaire de la première préconisée (§2) en intégrant les effets d'une diminution possible de la rigidité cylindrique pour l'estimation des moments de flexion. Toutefois le critère est encore en cours de calibrage, et sera discuté lors de l'Enquête Publique,

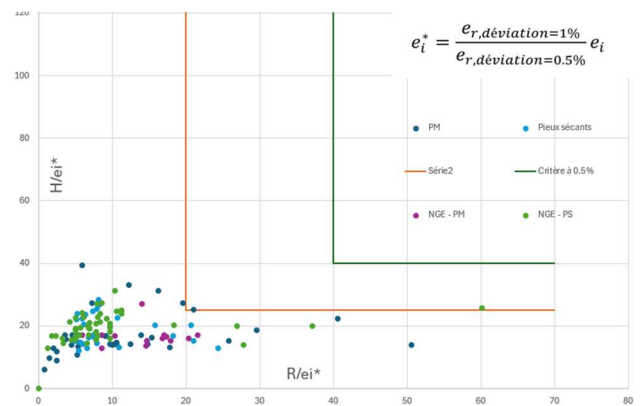


Figure 4. Ouvrages réels et critère de sensibilité à R_{cyl}

3.2 Cas des ouvertures

La création d'ouvertures dans la paroi circulaire conduit à perdre localement l'effet d'anneau. Un report de charge s'effectue de part et d'autre de l'ouverture. L'équilibre des efforts verticaux et horizontaux reste à vérifier. Pour l'équilibre horizontal, les calculs de contraintes peuvent être effectués comme décrits dans la recommandation AFTES par une modélisation de type « linteau », par l'annulation de la rigidité cylindrique sur un modèle 2D, ou par des modélisations 3D, permettant de mettre en évidence le linéaire de l'ouvrage influencé par l'ouverture.

Pour la vérification de la concentration de contraintes annulaires (compression) au droit de l'ouverture, le groupe de travail a proposé de moyenniser les contraintes calculées sur une hauteur limitée depuis l'ouverture (proposition à débattre lors de l'Enquête Publique d'une hauteur limitée à 3 fois

l'épaisseur nominale) et d'effectuer la vérification sur la contrainte moyenne (σ_{moy}). Le pic de contrainte maximale calculé au niveau de l'ouverture resterait à vérifier vis-à-vis de la contrainte maximale admissible (σ_{max}).

4 VERIFICATION DES CONDITIONS DE CHARGEMENT AXISYMETRIQUE

La mobilisation de la rigidité cylindrique d'un anneau reste associée à un chargement axisymétrique. Les conditions de projet peuvent s'écarter de cette hypothèse théorique du fait de la géométrie de l'ouvrage en ellipse ou multilobes par exemple, ou encore d'un chargement dissymétrique sur le pourtour de l'anneau. Dans ces configurations, la mobilisation de l'effet d'anneau reste possible mais nécessite des analyses complémentaires pour vérifier son fonctionnement et sa stabilité.

4.1 Cas des ellipses

Le cas des ouvrages présentant une forme d'ellipse nécessite une analyse particulière afin de vérifier qu'une ovalisation trop importante ne se crée pas sous l'effet du chargement comme illustré sur la Figure 5.

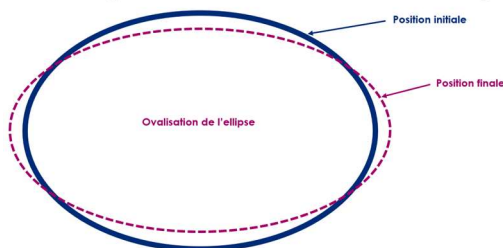


Figure 5. Exemple d'ovalisation particulière d'une ellipse

Pour cela, il est souvent nécessaire de recourir à un modèle 2D plan ou un modèle 3D afin de modéliser correctement d'une part les joints secs entre les éléments constitutifs de l'ouvrage et d'autre part l'ovalisation de l'ouvrage sous l'effet des chargements. Du fait de la géométrie de l'ouvrage en ellipse, les efforts ne sont pas parfaitement orthoradiaux et une rotation est possible au niveau de chaque joint. Pour ne pas sous-estimer les déformations et les sollicitations en flexion de l'ouvrage, il est donc nécessaire de bien modéliser ce joint et ne pas créer une liaison pouvant mobiliser des efforts de traction dans l'épaisseur de la section. Les déplacements et sollicitations des ouvrages elliptiques sont par conséquent plus importants.

De la même manière, la poussée n'est pas parfaitement axisymétrique. L'ovalisation de l'anneau peut conduire à une mise en butée de l'ouvrage en extrémité de l'ellipse (rayon de courbure faible) :

déplacement vers l'extérieur de l'ellipse comme visible sur l'exemple de la Figure 6. Un modèle plan est donc nécessaire pour bien vérifier la mise en compression de l'anneau inscrit.

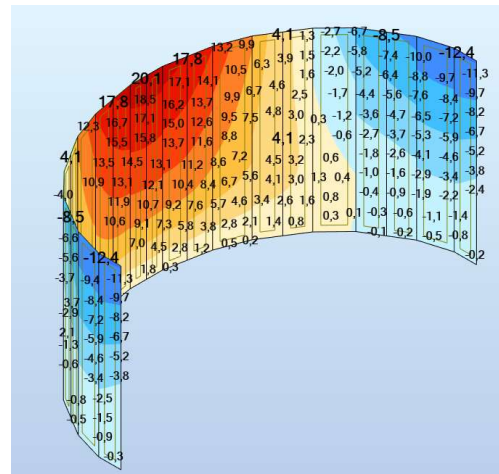


Figure 6. Exemple de déplacements calculés pour un ouvrage elliptique de 35m*25m

4.2 Cas des ouvrages « multilobes »

Pour conserver des dimensions circulaires proportionnées par rapport à la destination de l'ouvrage (et éviter la réalisation d'ouvrage de diamètre trop important), plusieurs lobes peuvent être accolés et sollicités de manière à assurer un comportement en rigidité cylindrique. La stabilité de ces ouvrages est assurée par le panneau de jonction concentrant les efforts des lobes attenants.

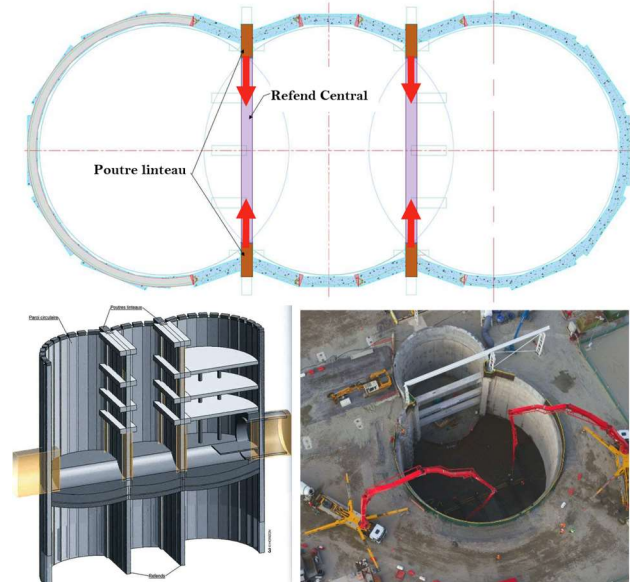


Figure 7. Exemple d'ouvrages multi-lobes

Le dimensionnement de ces panneaux doit faire l'objet d'une analyse particulière puisqu'ils conditionnent le bon fonctionnement global de l'ouvrage. A cet effet, il est usuel de réaliser des refends afin de minimiser les déplacements de ces appuis, de minimiser les sollicitations de ces poutres et

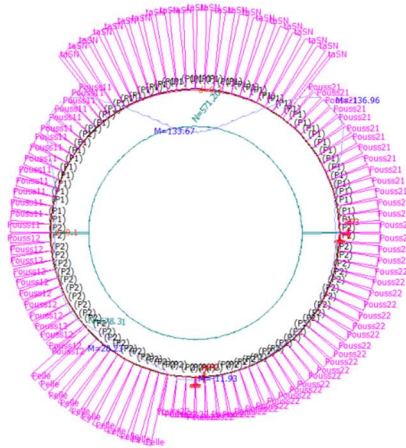


Figure 11. Modèle plan chargé dis-symétriquement

De la même manière sur un ouvrage en trilobe sur le bassin de Gèze (Marseille), une dissymétrie de chargement lié au pendage des couches a été intégrée dans les calculs analytiques 2D (via le logiciel RIDO) ou 3D (via le logiciel ROBOT). Comme visible sur la Figure 13, une variation de poussée est observée d'un lobe à l'autre du fait du pendage des couches (Figure 12). Mais ceci reste sans conséquence sur le ferrailage des parties circulaires de l'ouvrage qui sont dimensionnées au ferrailage minimal.

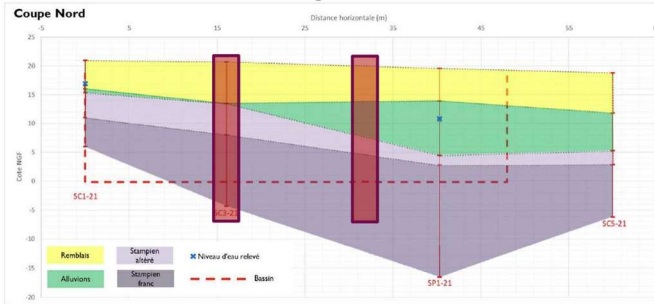


Figure 12. Profil en long du bassin avec un toit du substratum (gris) variable

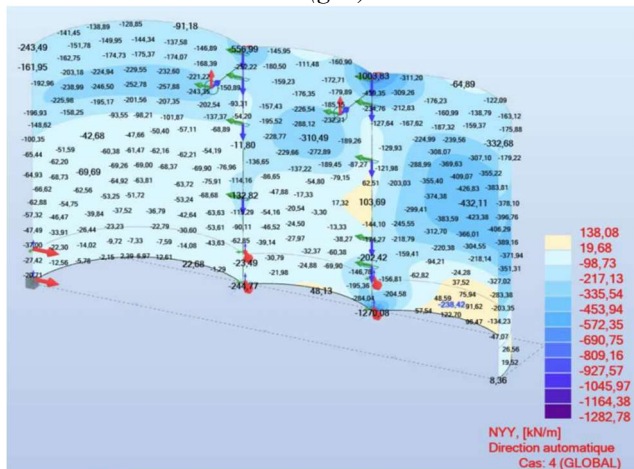


Figure 13. Sollicitation en compression orthoradiale dans les lobes du bassin

En revanche, comme le montre la Figure 14 et la Figure 15, les panneaux de jonctions sont impactés par

une dissymétrie de chargement provenant des lobes : chargements différents provenant des deux lobes et donc des sollicitations différentes d'un lobe à l'autre. Ils doivent donc être dimensionnés individuellement en conséquence. Notons que si une approche 2D à l'aide de la méthode de calcul aux coefficients de réaction peut permettre de bien appréhender le dimensionnement des parties lobées, l'estimation de la distribution des efforts dans les butons et refends centraux pourra nécessiter des calculs 3D permettant de mieux rendre compte des redistributions d'effort en amont du panneau de jonction. (Sabbah, 2018, Cahn 2021)

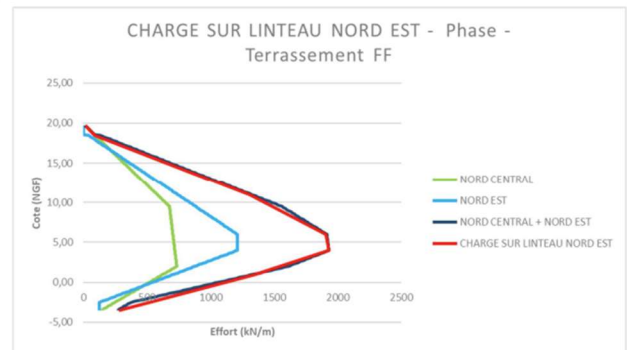


Figure 14. Effort calculé au niveau du panneau de jonction avec poussées dissymétriques (pendage du substratum)

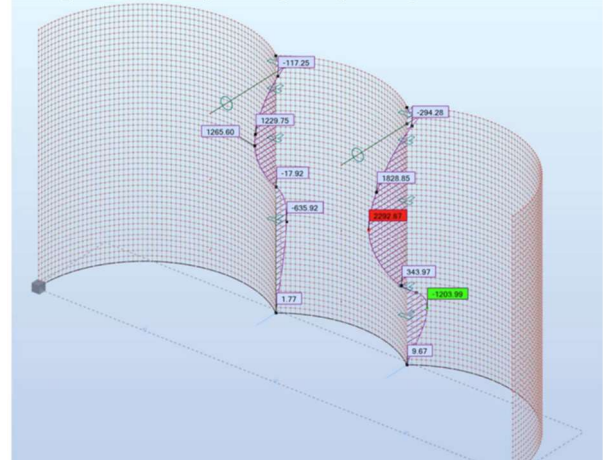


Figure 15. Sollicitations des panneaux de jonctions avec des poussées dissymétriques (pendage du substratum)

Un autre type de dissymétrie peut avoir lieu en fonction du phasage de terrassement, voire de rabattement, à l'extérieur ou à l'intérieur de l'ouvrage. Ainsi, sur l'exemple du bassin de Nantes (Schlosser 2007), les résultats d'auscultation, ayant révélée une ovalisation de l'ouvrage, s'expliquent par la modélisation 3D effectuée (Marten 2005) dans laquelle le terrassement intérieur dissymétrique est pris en compte (Figure 16). Les ouvrages annexes de ventilation ou secours pour les infrastructures souterraines linéaires (Grand Paris par exemple) imposent parfois un terrassement et même un rabattement différent selon le linéaire du puits (Figure

17). Ces configurations conduisent à un déséquilibre de poussées mobilisant la résistance en flexion des éléments structuraux.

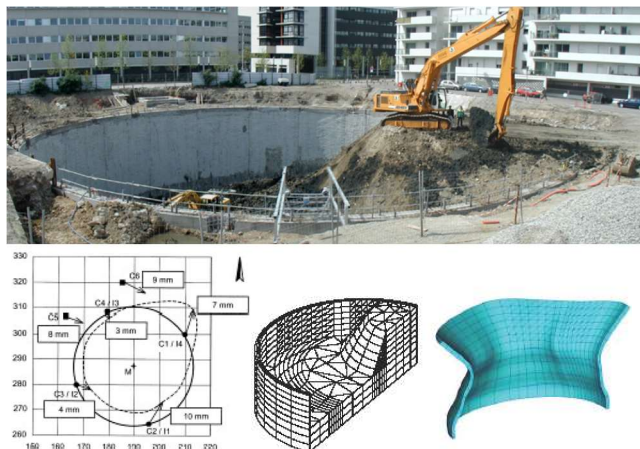


Figure 16. Ovalisation liée au terrassement (Marten 2005)



Figure 17. Flexion d'axe verticale dans un puits du Grand Paris soumis à des conditions de terrassement dissymétriques

Enfin, les actions sismiques peuvent également induire des dissymétries de chargement sur l'ouvrage et nécessiter des justifications particulières (Exemple du terminal Méthanier Dunkerque, Photographie Figure 7, Vidil 2020, ou du bassin de Geze, Godreau 2024).

5 CONCLUSION

Le document du groupe de travail proposé dans le cadre de la révision de la norme NF P94-282 associée à la 2ème génération des Eurocodes permet de définir les principes de conception des ouvrages circulaires et plus particulièrement les hypothèses prudentes à retenir pour vérifier le bon fonctionnement des ouvrages mobilisant la rigidité cylindrique.

Comme précisé dans le corps de texte du document, un consensus existe sur la nécessité de bien maîtriser les tolérances d'exécution sur de tels ouvrages. En effet, la stabilité de l'ouvrage reste conditionnée par la bonne continuité de l'anneau et le transit de l'effort en tout point.

Vis-à-vis des efforts de flexion, des premiers calculs paramétriques complémentaires ont été

effectués afin d'appréhender des critères permettant de définir les caractéristiques d'ouvrages pour lesquels la prise en compte des déviations pourrait nécessiter un deuxième calcul intégrant une rigidité cylindrique dégradée. Ces études sont à affiner pour fiabiliser les dimensionnements sans alourdir les études au regard des multiples retours d'expérience actuellement disponibles.

Lorsque les conditions d'axisymétrie conduisent à modifier significativement les poussées appliquées sur l'ouvrage, des analyses particulières sont à prévoir pour bien prendre en compte les effets des dissymétries.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFTES GT28R2F1 : Puits superficiels (2023). *Recommandation du GT28R2F1, 2023*, N° ISBN : 978-2-901148
- Cahn M., Nguyen N.H., Cuiria F., Fonty M., Santos C., Utter N. (2022) Quelques considérations pratiques autour des justifications géotechniques des puits circulaires. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur*, Lyon, fhal-03720077
- Cahn M., Berbet T., Fonty M., Passot P.-B., Dupuis L., (2021) Puits de démarrage du tunnelier de l'île de Monsieur, tronçon T3A de la ligne 15 sud du Grand Paris Express : Conception, exécution, et rétro-analyse, *Congrès de l'AFTES*.
- Godreau A., Hunaut B., Schilling P., (2024) Travaux du bassin de rétention des eaux unitaires du Capitaine Geze à Marseille (13) *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur*, Poitiers
- Marten S. (2005) Etude expérimentale et méthodologique sur le comportement des écrans de soutènement, *LCPC, Paris, France*.
- Sabbah M., Cahn M., Giacometti B., Fonty M., Passot P.-B. (2018) *OAP13, Un puits de lancement de tunnelier sur la ligne 15 au coeur du site protégé de l'île de Monsieur*, Travaux n°947.
- Schlosser F., Schmitt P. (2007) *La méthode observationnelle : du suivi géotechnique au Dimensionnement interactif*. Travaux 844 :99-106.
- Vidil P. (2016) Conception et dimensionnement du puits et de la station de pompage du terminal méthanier de Dunkerque, *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur - Nancy*