

Analyse du renard solide pour des ouvrages de soutènement circulaires : cas d'un ouvrage de service de la ligne 15 Ouest-Sud du Grand Paris Express

Basal heave analysis in deep circular shafts: a case study of a ventilation shaft along the Grand Paris Express Line 15 West-South Section

Amine BEN YUSEF^{1*}, Aishwarya PRABHAKARAN¹, Soizic KERFONTAIN¹

1 GEOS Ingénieurs Conseils, Rueil-Malmaison, France

**amine.benyusef@geos.fr*

RESUME : Dans le cadre du projet Grand Paris Express – Ligne 15 Ouest-Sud, GEOS a mené la conception d'un ouvrage de service, situé à la limite entre les communes de Nanterre et Puteaux : une paroi moulée circulaire de 60m de profondeur, de diamètre extérieur de 20,40m, ancrée dans une formation particulièrement hétérogène de Fausses Glaises. L'excavation à l'intérieur de l'ouvrage atteint 50m de profondeur, s'arrêtant au-dessus des Fausses Glaises. La paroi moulée traverse une nappe située 23m au-dessus de sa fiche, et 12m au-dessus du fond de fouille. Les Fausses Glaises contiennent d'intercalations argileuses situées dans une matrice majoritairement sableuse et limoneuse avec des faibles paramètres de cisaillement. Le retour d'expérience sur ce type d'ouvrages montre la non-compatibilité de la méthode de rupture selon le schéma de Prandtl pour l'évaluation du risque de renard solide pour des ouvrages non-rectangulaires, profondes et de faible surface. Bien que la norme applicable aux ouvrages de soutènement reconnaisse les limites de cette méthode pour des ouvrages circulaires, aucune adaptation des formules de calcul pour ces derniers n'est proposée. Comme attendu, les calculs selon la norme française indiquaient une rupture, avec un facteur de sécurité de 0,5. Un calcul aux éléments finis a donc été considéré pour la vérification de la stabilité du fond de fouille, en établissant un modèle axisymétrique de la paroi circulaire, avec une analyse couplée déformation-écoulement. Un calcul de stabilité selon la méthode c-phi-réduction a ensuite été effectué pour déterminer le coefficient de sécurité vis-à-vis du renard solide. Cette approche a permis de confirmer la contribution significative de la géométrie de l'ouvrage à la réduction du risque de rupture du fond de fouille. Une étude paramétrique a enfin été menée à partir du calcul aux éléments finis afin de proposer une méthode analytique simplifiée pour la vérification du renard solide.

ABSTRACT: The Grand Paris Express project aims to create new transit lines and extend existing ones across the Île-de-France region of France. In 2023, the West-South section of Metro Line 15 was awarded by Société des Grands Projets (SGP) to a consortium that includes GEOS Ingénieurs Conseils, responsible for geotechnical design of three metro stations and six service/ventilation shafts under a Design & Build framework. This paper focuses on one ventilation shaft located in between the suburbs of Nanterre and Puteaux. The shaft consists of 60-meter-deep diaphragm walls with a 20.4-meter external diameter, embedded in a heterogeneous soil layer known as "Fausses Glaises" (FG). Excavation reaches about 50 meters, intersecting the groundwater table 23 meters above the wall base and 12 meters above the final excavation level. FG consists of clayey intercalations within a sandy-silty matrix with poor shear strength. For deep circular shafts, the traditional Prandtl failure mechanism for basal heave verification was found unsuitable. Although French standard NF P94-282 acknowledges this limitation, it proposes no adaptations for circular diaphragm walls. Calculations using this analytic method indicated a safety factor of 0.5, resulting in failure. Consequently, a finite element analysis was performed using PLAXIS 2D with an axisymmetric model and a deformation analysis. This approach accounted for ground water flow through sandy layers (drained parameters) and clayey layers (undrained parameters). A safety analysis using the "c-phi reduction" method confirmed a significant effect of shape on basal heave stability in circular shafts. Finally, a parametric study proposed a modified plastic failure mechanism for circular excavations in fine-grained soils, prior to introducing a simplified analytical approach that incorporates shape factor, excavation depth, and seepage effects.

Mots-clés : Renard solide ; ouvrage de service ; éléments finis.

1 INTRODUCTION

1.1 Présentation du projet de la ligne 15 Ouest-Sud du Grand Paris Express

La ligne 15 du Grand Paris Express constitue une future liaison de métro de 75 km, conçue pour contourner Paris et offrir une connexion rapide et directe entre les banlieues de la petite couronne de la région Île-de-France. Cette infrastructure majeure vise à améliorer la mobilité dans la région parisienne. La section Ouest de la ligne s'étend sur 20 km et dessert 14 communes situées au nord et au nord-ouest de la région parisienne. Elle comprend 9 gares et 20 ouvrages de service et de ventilation, répartis en deux tronçons distincts : Ouest-Nord et Ouest-Sud. Ce dernier, illustré par la figure 1, mesure 14 km et comporte 5 gares (hors Bécon-les-Bruyères) ainsi que 16 ouvrages de service, dont l'ouvrage circulaire OA2703.

Le marché de Conception-Réalisation (COREA) pour la ligne 15 Ouest-Sud a été attribué par le Maître

d'Ouvrage, la Société des Grands Projets (SGP), au groupement Intencités15. GEOS Ingénieurs Conseils, membre du groupement, est chargé des études de conception pour 3 gares stratégiques (La Défense, Nanterre la Folie et Nanterre la Boule) et 6 ouvrages de ventilation (OA2601, OA2602, OA2702, OA2703, OA2802, OA2803).

1.2 Ouvrage de service OA2703

L'ouvrage de service OA2703 est un ouvrage d'accès de secours et de ventilation et de désenfumage pour la ligne 15 Ouest-Sud. Il est situé à la limite entre les communes de Nanterre et Puteaux, dans une zone urbaine dense, et à proximité immédiate d'immeubles résidentiels.

Ses caractéristiques géométriques, détaillées dans le tableau 1 (NGF : Nivellement Général de France), incluent une profondeur supérieure à 60 m et un diamètre extérieur de 20,4 m.



Figure 1. Vue aérienne du département des Hauts-de-Seine (92), montrant le tracé de la ligne 15 Ouest-Sud

Tableau 1. Caractéristiques géométriques de l'OA2703

Géométrie	Valeur
Diamètre externe	20,4 m
Epaisseur	1,2 m
Diamètre interne	18 m
Profondeur d'ancrage	60,17 m
Niveau du terrain naturel	65,6 m NGF
Niveau du fond de fouille	16,01 m NGF
Niveau d'ancrage	5,43 m NGF

Il convient de préciser que la paroi moulée circulaire est partiellement remordue par le tunnelier de la ligne 15, afin d'établir une connexion directe entre l'ouvrage et le futur tunnel, sans nécessiter la réalisation d'un rameau. L'ouverture ainsi créée présente une hauteur d'environ 10 m et se situe entre 40 et 50 m de profondeur par rapport au terrain naturel. L'ouvrage circulaire et le tunnel du métro sont illustrés en figure 2 (a), tandis qu'une vue en plan de ces deux éléments est proposée en figure 2 (b).

Il convient de préciser que la paroi moulée circulaire est partiellement remordue par le tunnelier de la ligne 15, afin d'établir une connexion directe entre l'ouvrage et le futur tunnel, sans nécessiter la réalisation d'un rameau. L'ouverture ainsi créée présente une hauteur d'environ 10 m et se situe entre 40 et 50 m de profondeur par rapport au terrain naturel. L'ouvrage circulaire et le tunnel du métro sont illustrés en figure 2 (a), tandis qu'une vue en plan de ces deux

éléments est proposée en figure 2 (b). Cet ouvrage circulaire traverse un grand nombre de formations de sols et de roches caractéristiques de la géologie francilienne, indiquées dans le tableau 2. La paroi est ancrée dans une couche très hétérogène appelée « Fausses Glaises » (FG). Selon la zone et la profondeur, cette formation peut être sableuse ou limoneuse, avec une perméabilité élevée, ou au contraire argileuse, avec une perméabilité nettement plus faible. Cette hétérogénéité est manifeste, tant latéralement que verticalement. Elle entraîne des difficultés pour justifier la stabilité hydraulique de l'ouvrage circulaire vis-à-vis de phénomènes tels que le soulèvement hydraulique ou la boulangerie. Par ailleurs, lors de la conception, les reconnaissances géotechniques disponibles ne permettaient pas d'identifier précisément la nature de cette formation au droit de l'ouvrage, les sondages étant situés à plusieurs centaines de mètres. Néanmoins, ces données ont permis d'établir une stratigraphie initiale au droit de la paroi circulaire, que l'on présente dans le tableau 2. Les paramètres de cisaillement et de perméabilité des FG, présentés dans le tableau 3, ont permis de démontrer l'absence de risque de rupture du fond de fouille en phase travaux vis-à-vis du soulèvement hydraulique et de la boulangerie. Enfin, il restait à vérifier la stabilité du fond vis-à-vis du renard solide, objet de cet article.

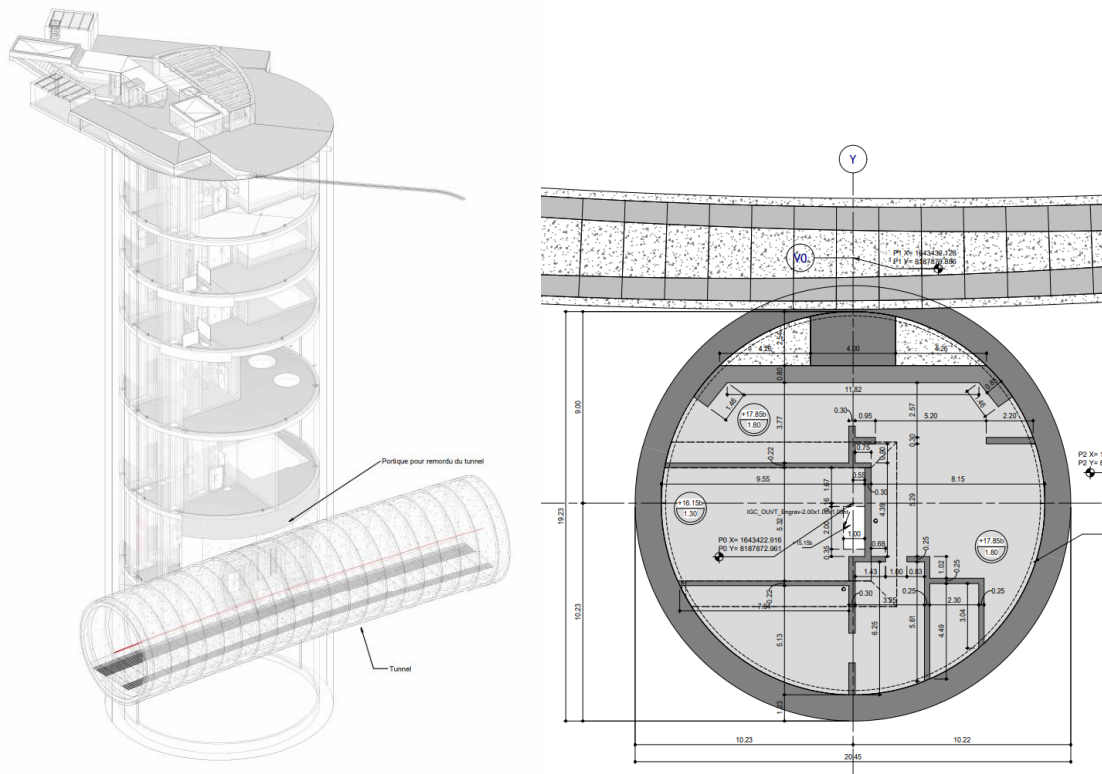


Figure 2. (a) Vue 3D de l'ouvrage de service de l'OA2703 et du tunnel de la ligne 15. (b) Vue en plan de l'OA2703.

Tableau 2. Formations géologiques rencontrées au droit de l'OA2703

Stratigraphie	Nature	Cote de toit (m NGF)	Cote de base (m NGF)
Sables de Beauchamp (SB)	Sable	64,8	55,8
Marnes et Caillasses marneuses (MCm)	Marnes/calcaire	55,8	43,8
Marnes et Caillasses rocheuses (MCR)	Calcaires/marne	43,8	40,9
Calcaire Grossier supérieur (CGsup)	Calcaire	40,9	39
Calcaire Grossier moyen (CGmoy)	Calcaire	39	31,4
Calcaire Grossier inférieur (GCinf)	Calcaire	31,4	27,4
Sables Supérieurs (SS)	Sable	27,4	15
Fausses Glaises (FG)	Sable/limon et argile	15	-

Tableau 3. Paramètres de cisaillement et de perméabilité de la formation des FG

Stratigraphie	c' (kPa)	ϕ' (°)	s_u (kPa)	$k_h = k_v$ (m/s)
FG – horizons sableux/limoneux	20	15	-	10^{-5}
FG – horizons argileux	-	-	148	$2,3 \cdot 10^{-7}$

2 ANALYSE DU RISQUE DE RENARD SOLIDE

Le renard solide est un mode de rupture qui apparaît lorsque le sol situé en aval d'un écran de soutènement est fortement déchargé, par exemple après une excavation, jusqu'au point où le poids du sol et de l'eau en amont devient largement supérieur à celui en aval. Ce risque est aggravé lorsque le sol en aval, sous le niveau du fond de fouille, présente de faibles caractéristiques mécaniques. Il s'agit d'une vérification essentielle à réaliser lors de la conception d'un ouvrage de soutènement.

La norme française relative aux écrans de soutènement (NF P94-282) propose une méthode pour s'assurer de l'absence de risque de renard solide. Elle consiste à vérifier que la somme des contraintes déstabilisatrices ($q_{dst;d}$) reste inférieure à celle des contraintes stabilisatrices ($q_{stb;d}$). La figure 3 met en évidence les paramètres nécessaires à cette vérification, en lien avec la géométrie de l'écran de soutènement, la profondeur d'excavation et les niveaux de nappe en amont et en aval de l'écran. Les notations utilisées sont z_0 = la cote de tête de l'écran ; z_{w1} = le niveau de nappe amont ; z_h = la cote du fond de fouille ; z_{w2} = le niveau de nappe aval ; z_f = la cote d'ancrage de l'écran.

Les équations ci-après permettent de calculer les paramètres que l'on trouve en figure 3, et qui sont nécessaires pour l'évaluation de $q_{dst;d}$ et $q_{stb;d}$:

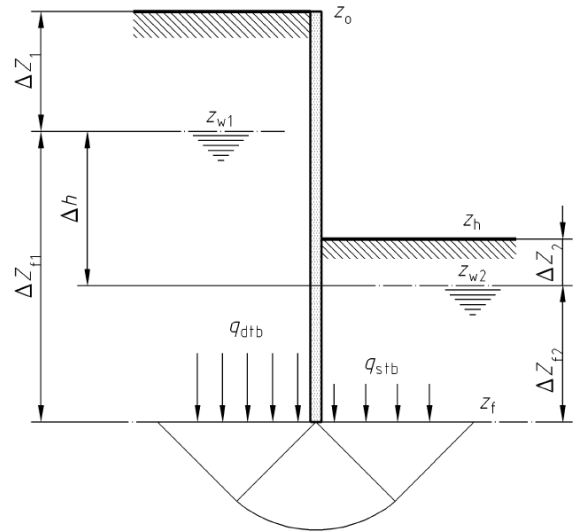


Figure 3. Vérification du renard solide selon la NF P94-282

$$\Delta h = z_{w1} - z_{w2} \quad (1)$$

$$\Delta Z_{f1} = z_{w1} - z_f \quad (2)$$

$$\Delta Z_{f2} = z_{w2} - z_f \quad (3)$$

$$\Delta Z_1 = z_0 - z_{w1} \quad (4)$$

$$\Delta Z_2 = z_h - z_{w2} \quad (5)$$

La méthode de calcul prend en compte la notion de perte de charge due à la différence de niveau de nappe en amont et en aval. Le rapport de perte de charge (ρ) est déterminé selon la formule proposée par Mandel (1951) :

$$\rho = 0.095 + \frac{0.81}{1 + \sqrt{1 + \frac{\Delta h}{\Delta Z_{f2} + \Delta Z_2}}} \quad (6)$$

La somme des contraintes déstabilisatrices ($q_{dst;d}$) est ensuite calculée en tenant compte du poids du sol et de l'eau amont de l'écran, tel qu'indiqué par l'équation (7) :

$$q_{dst;d} = [q_1 + \gamma_1 \cdot \Delta Z_1 + [\gamma_1 - (1 - i_1) \gamma_w] \Delta Z_{f1}] \times \gamma_{G;dst} \quad (7)$$

Où q_1 = la surcharge en amont de l'écran ; γ_1 = le poids volumique du sol en amont de l'écran ; i_1 = la perte de charge en amont de l'écran ; γ_w = le poids

volumique de l'eau (10 kN/m³) ; $\gamma_{G;dst}$ = un facteur de majoration égal à 1,35.

La somme des contraintes stabilisatrices ($q_{stb;d}$) est calculée en tenant compte du poids du sol et de l'eau aval de l'écran, ainsi que les paramètres de cisaillement drainés du sol sous le fond de fouille, tel qu'indiqué par l'équation (8) :

$$q_{stb;d} = \left[N_q \cdot \sigma'_{v2;k} + c' \left(\frac{N_q - 1}{\tan(\phi_r)} \right) \right] \times \gamma_{G;stb} \quad (8)$$

Où c' = la cohésion du sol sous le fond de fouille ; ϕ' = l'angle de frottement du sol sous le fond de fouille ; $\gamma_{G;stb}$ = un facteur de majoration égal à 0,90.

$\sigma'_{v2;k}$ est la valeur caractéristique de la contrainte verticale effective au niveau de l'ancrage de l'écran, calculée tel qu'indiqué par l'équation (9) :

$$\sigma'_{v2;k} = q_2 + \gamma_2 \cdot \Delta Z_2 + [\gamma_2 - (1 + i_2) \gamma_w] \Delta Z_{f2} \quad (9)$$

Où q_2 = la surcharge en aval de l'écran ; γ_2 = le poids volumique du sol en aval de l'écran ; i_2 = la perte de charge en aval de l'écran.

N_q est un facteur de cisaillement calculé selon l'équation (10) :

$$N_q = e^{\pi \cdot \tan(\phi')} \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (10)$$

Lorsqu'un sol non drainé est présent sous le fond de fouille, comme dans le cas de l'horizon argileux des FG à très faible perméabilité, les équations (7) et (9) ne prennent pas en compte la perte de charge entre l'amont et l'aval de l'écran. Par ailleurs, la somme des contraintes stabilisatrices ($q_{stb;d}$) est calculée en fonction de la cohésion non drainée de l'horizon concerné, ce qui s'exprime comme suit :

$$q_{stb;d} = [(\pi + 2) \cdot s_u] \times \gamma_{G;stb} \quad (11)$$

Où s_u = la cohésion non drainée.

En conditions non drainées, les facteurs d'amplification $\gamma_{G;dst}$ et $\gamma_{G;stb}$ sont égaux à 1.

Il convient de souligner que cette méthode de calcul, bien qu'elle intègre plusieurs paramètres tels que les surcharges appliquées en amont de l'écran, le poids du sol et de l'eau ainsi que les caractéristiques de cisaillement du sol sous le fond de fouille, ne prend pas en compte certains facteurs liés à la géométrie de la structure de soutènement. En effet, elle a été conçue pour des écrans plans et de longueur infinie. Il est établi que, pour des excavations de largeur réduite et de longueur finie, la géométrie de l'ouvrage améliore le facteur de sécurité vis-à-vis du renard solide, comme démontré par Bjerrum et Eide (1956). Concernant les

ouvrages circulaires, objet de cette étude, ces effets géométriques sont encore plus marqués pour les parois de petit diamètre, ce qui ne doit pas être négligé. Toutefois, et dans le cadre de la conception de l'ouvrage OA2703, cette méthode fondée sur le schéma de Prandtl a été appliquée. Comme prévu, les résultats ont montré que la stabilité du fond de fouille vis-à-vis du renard solide ne pouvait être vérifiée, avec un facteur de sécurité de $0,53 < 1$. Malgré la cohésion non drainée relativement élevée des FG argileuses (148 kPa), il n'était pas possible de justifier la stabilité sans considérer l'effet de la géométrie circulaire.

3 ANALYSE AUX ELEMENTS FINIS

Dans le cadre de la conception de l'ouvrage OA2703 réalisée par GEOS, une analyse par éléments finis a été proposée afin de démontrer l'absence de risque de renard solide en fond de fouille, contrairement aux résultats obtenus avec la méthode analytique définie par la NF P94-282. Le modèle adopté est axisymétrique, ce qui permet de prendre en compte la géométrie circulaire de l'ouvrage.

Les formations géologiques indiquées dans le tableau 2 ont été modélisées avec le modèle *Hardening Soil*, basé sur une loi de comportement non-linéaire du sol. Ce modèle requiert la définition de paramètres tels que le module œdométrique (E_{oed}), le module de premier chargement (E_{50}) et le module de déchargement (E_{ur}) du sol.

Le comportement des horizons de sol et de roche est considéré drainé, avec les paramètres de cisaillement drainés tels que c' , ϕ' et ψ' (angle de dilatation). Toutefois, et afin d'intégrer le comportement non drainé des horizons argileux des FG (type de drainage Undrained B), la cohésion non drainée (s_u) est introduite au modèle PLAXIS 2D. Une surcharge travaux de 20 kPa est appliquée au niveau du terrain naturel à l'extérieur de la paroi circulaire.

Le phasage inclut l'application de la surcharge des travaux, la création de la paroi circulaire, l'ouverture due au passage du tunnelier, puis plusieurs étapes d'excavation jusqu'au fond de fouille. Après chaque étape, une analyse des déformations est réalisée pour visualiser le soulèvement du sol dû au déchargement interne, observable en figure 4 (b), ainsi que la surface des déformations verticales en figure 4 (c).

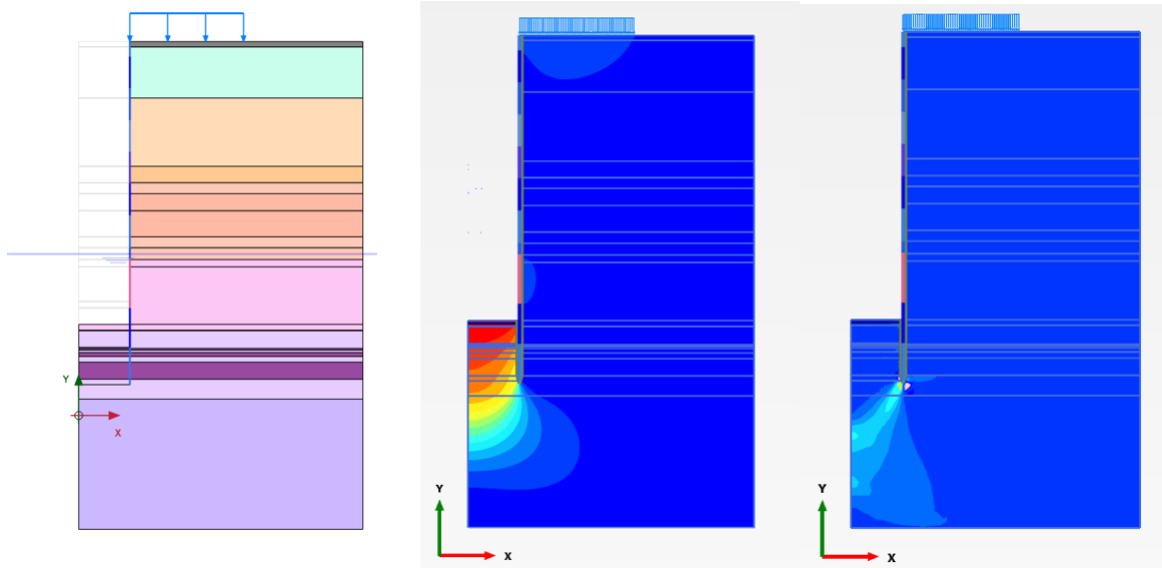


Figure 4. (a) Modèle axisymétrique de l'ouvrage circulaire OA2703 sur PLAXIS 2D. (b) Déplacement vertical du sol évalué par le modèle axisymétrique de PLAXIS 2D. (c) Déformation cartésienne totale ϵ_{yy} évaluée par le modèle axisymétrique de PLAXIS 2D.

Cette surface présente une forme conique ou triangulaire, similaire au schéma de Prandtl (figure 3), où la déformation progresse de l'amont vers l'aval, générant le soulèvement au fond de fouille.

A la suite de l'analyse des phases d'excavation, une analyse de la stabilité de l'ouvrage est ensuite effectuée dans le but d'évaluer le risque de renard solide pour un ouvrage circulaire. L'approche est basée sur la méthode de réduction c-phi : les paramètres de cisaillement sont divisés par un coefficient qui est progressivement augmenté jusqu'à la divergence du modèle de calcul. Dans ce cas, cette divergence correspond à un soulèvement excessif lié à une rupture par renard solide. Les résultats de cette phase de calcul indiquent un facteur de sécurité de 1,64, supérieur donc à la valeur requise pour prouver la stabilité de l'ouvrage vis-à-vis du renard solide, qui est de 1,50, en absence de coefficients de réduction appliqués au modèle de calcul. Il a donc été conclu que le risque de rupture du fond de fouille par renard solide en phase travaux n'était pas présent, ce que la méthode analytique de la NF P94-282 n'a pas permis de justifier, car elle ne tient pas compte de la géométrie particulière de ce type d'ouvrages.

4 ETUDE PARAMETRIQUE RELATIVE A LA GEOMETRIE DE L'OUVRAGE

4.1 Exemple de l'ouvrage circulaire OA2703

Afin d'évaluer l'influence de la géométrie sur le facteur de stabilité de l'ouvrage, une étude paramétrique a été réalisée à partir du modèle axisymétrique développé sur PLAXIS 2D pour

l'OA2703, en faisant varier le diamètre de la paroi circulaire afin d'analyser son impact sur la stabilité vis-à-vis du renard solide et d'établir une corrélation entre ces deux paramètres. Certains auteurs ont montré que la profondeur d'ancrage de l'ouvrage circulaire sous le fond de fouille pouvait également avoir un impact sur le facteur de sécurité, mais puisque cette profondeur reste généralement faible pour ce type d'ouvrages, ce paramètre n'a pas été étudié.

L'analyse a été conduite pour plusieurs diamètres (10, 15, 18, 20, 22, 25, 30, 35 et 40 m), tout en conservant constantes les autres caractéristiques géométriques de l'écran et les paramètres du sol. La figure 5 illustre que la relation entre le diamètre de l'ouvrage (D) et le facteur de sécurité (FS) suit une tendance logarithmique, que l'on peut exprimer comme suit :

$$SF = a \cdot \ln(D) + b \quad (12)$$

Où a et b sont des coefficients empiriques qui dépendent d'autres caractéristiques géométriques de l'écran circulaire, telles que la profondeur d'ancrage ou d'excavation, ainsi que des paramètres de cisaillement du sol. Pour l'exemple de l'ouvrage OA2703, ces coefficients ont été évalués à $a = -0,76$ et $b = 3,86$.

Selon l'équation (12), le facteur de sécurité diminue avec l'augmentation du diamètre, ce qui pourrait s'expliquer par l'effet de voûte plus marqué pour les ouvrages circulaires de petit diamètre, ce qui réduit le soulèvement lié au renard solide. Cette observation confirme que le mécanisme du renard solide dépend directement de la géométrie d'une structure, un aspect non pris en compte par la méthode analytique proposée dans la NF P94-282.

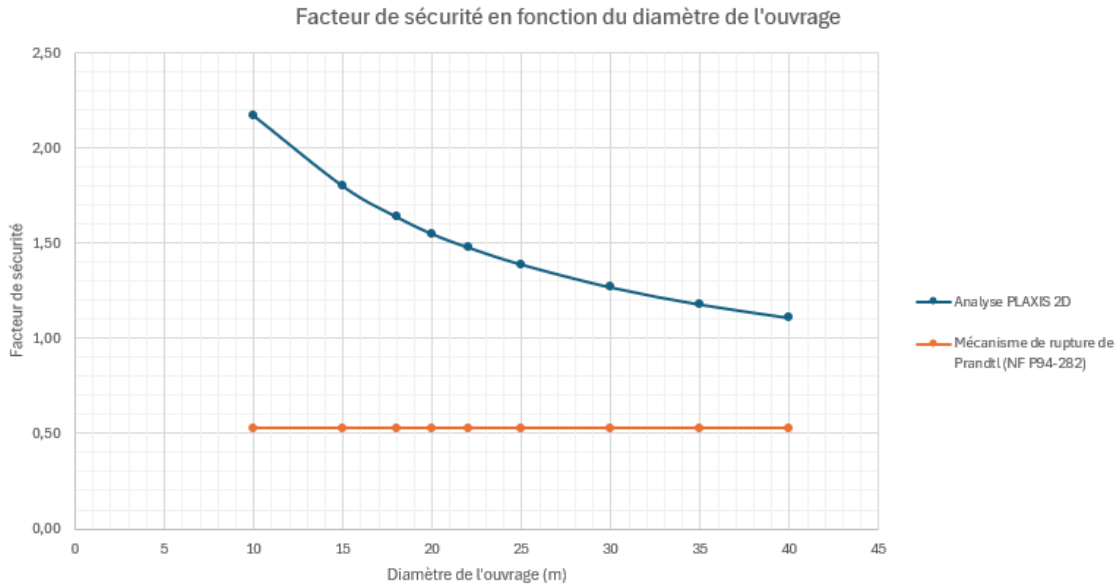


Figure 5. Relation logarithmique entre le diamètre de l'ouvrage et le facteur de sécurité vis-à-vis du renard solide, basée sur l'analyse PLAXIS 2D de l'OA2703.

4.2 Analyse pour un double-écran plan

Par la suite, une étude paramétrique a été réalisée pour le cas d'un double-écran plan de longueur infinie. L'objectif était de faire varier la largeur de la fouille (D) et la hauteur d'excavation aval (H) afin de mettre en évidence la présence d'une interaction entre les deux écrans qui aurait un impact sur la stabilité vis-à-vis du renard solide. Le modèle utilisé est un modèle 2D plan par éléments finis. La hauteur d'excavation est variée entre 30 et 38 m par incréments d'1 m, tandis que la largeur de la fouille est variée en retenant les valeurs 18, 20, 22, 25, 30, 35, 40, 50, 70 et 100 m. La stratigraphie et les caractéristiques du sol sont identiques à celles du modèle axisymétrique de l'OA2703.

Les résultats obtenus montrent une évolution du facteur de sécurité en fonction des deux paramètres étudiés. La figure 6 illustre que plus la largeur d'ouverture augmente, plus le facteur de sécurité est dégradé, ce qui relève une interaction entre les deux écrans lorsqu'ils sont proches. Ceci peut également être observé sur la figure 7. En effet, on peut observer que pour des faibles largeurs de la fouille, l'impact de la hauteur d'excavation sur la sécurité de l'ouvrage est plus important quand la largeur de la fouille est petite (exemple $D = 18$ m). A l'inverse, pour une largeur de fouille importante ($D = 100$ m), l'impact sur le facteur de sécurité en fonction de la hauteur d'excavation est moins prononcé. Ces observations confirment donc la corrélation entre la géométrie de l'ouvrage (double-écran) et la hauteur de l'excavation sur la sécurité de l'écran de soutènement vis-à-vis du renard solide, ce

qui n'est pas pris en compte dans la méthode de calcul analytique de la NF P94-282.

5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les ouvrages de soutènement circulaires deviennent de plus en plus populaires dans les zones urbaines, grâce à leur rigidité cylindrique élevée qui limite les déformations latérales. Leur utilisation étant relativement récente, les méthodes analytiques disponibles à ce jour pour justifier leur stabilité vis-à-vis du renard solide ne prennent en compte l'effet de la géométrie. L'application de ces méthodes s'avère très pénalisante, comme l'a montré l'étude effectuée sur l'ouvrage OA2703, prévu dans le cadre du projet de la Ligne 15 Ouest-Sud du Grand Paris Express. Une analyse aux éléments finis basée sur un modèle de calcul axisymétrique a été réalisée pour démontrer la stabilité de l'ouvrage vis-à-vis du renard solide pour l'OA2703. Une étude paramétrique a ensuite été conduite afin d'évaluer l'influence de la géométrie de l'ouvrage circulaire sur la stabilité du fond de fouille. Une relation logarithmique a été identifiée entre le diamètre de la paroi moulée circulaire et le facteur de sécurité associé au renard solide. Dans le même cadre, une analyse paramétrique effectuée sur un cas d'ouvrage en double écran a permis de montrer la présence d'un lien entre la géométrie de l'ouvrage et de la hauteur d'excavation sur la stabilité de l'ouvrage vis-à-vis du renard solide.

D'autres paramètres tels que la profondeur d'ancrage de la paroi, le niveau d'excavation ainsi que les caractéristiques du sol sous le fond de fouille influencent également le phénomène du renard solide.

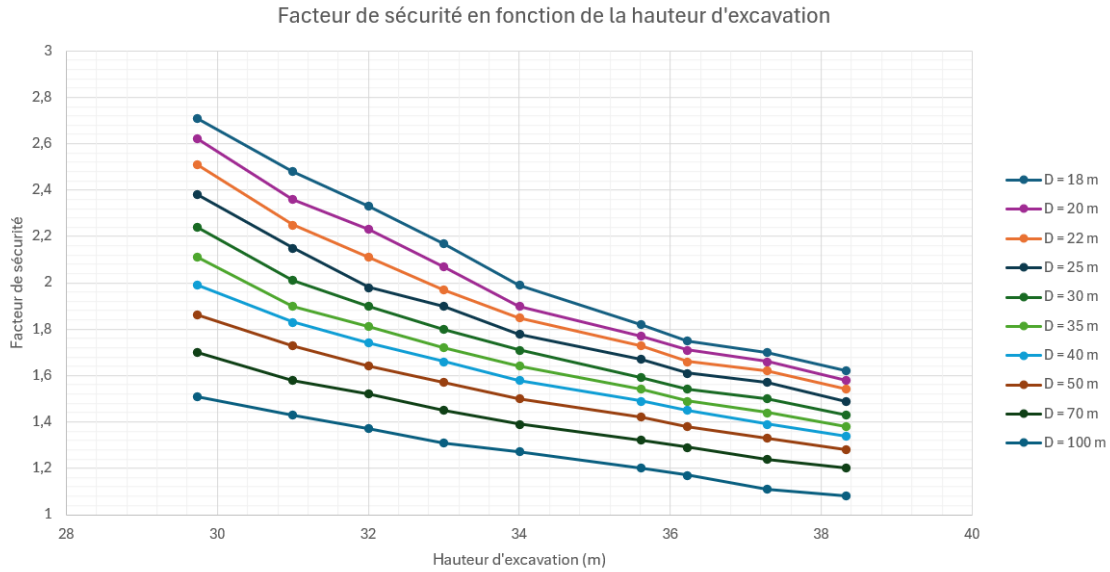


Figure 6. Evolution du facteur de sécurité en fonction de la hauteur d'excavation, pour différentes largeurs de la fouille

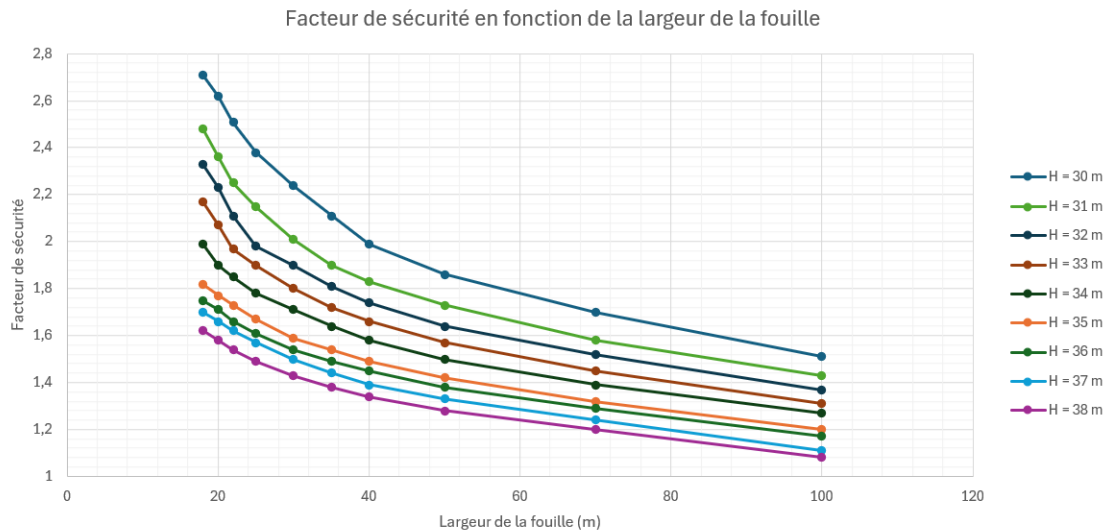


Figure 7. Evolution du facteur de sécurité en fonction de la largeur de la fouille, pour différentes hauteurs d'excavation

Dans la continuité de ce travail, une analyse paramétrique par éléments finis intégrant ces paramètres serait à effectuer dans le but d'identifier et de définir des corrélations entre ces paramètres et le niveau de sécurité en phase travaux, dans l'objectif de proposer une méthode analytique simplifiée permettant d'évaluer le risque du renard solide, applicable aux projets de construction.

6 REMERCIEMENTS

GEOS Ingénieurs Conseils remercie les membres du Groupement Intencités15 : Vinci Construction Grands Travaux, Chantiers Modernes Construction, Dodin Campenon Bernard, ETF, Vinci Energies (SDEL Infî), Razel-Bec, Fayat Energie Services, Ingérop, Artelia, JFS Architectes, Grimshaw, AREP Architectes, Archi 5 Prod and Philippe Gazeau Architecte, de leur

contribution à la conception et à la réalisation des travaux de la ligne 15 Ouest-Sud, y compris l'ouvrage OA2703.

7 REFERENCES

- Mandel, J. (1951). Ecoulement de l'eau sous une ligne de palplanches : abaque pour la condition de renard. Travaux.
- Bjerrum, L. and Eide, O. (1956). Stability of strutted excavations in clay. *Géotechnique*, March, Volume 6, p. 32-47.
- AFNOR (2009). Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement. Ecrans. NF P94-282.