

Etude sur la prise en compte des effets de voûte dans les soutènements discontinus

Analysis of arching effects in discontinuous retaining structures

Philippe LEGRAND ^{1*}, Laurianne LAUNAY ¹, Hossein ESLAMI ², Maxime FONTY ³, Arnaud LAFOURCADE ⁴, Loïc LEURENT ⁵, Gilles VALDEYRON ⁵

1 NGE Fondations, Issy-les-Moulineaux, France

2 Fayat Fondations 2, Grigny, France

3 Soletanche Bachy, Rueil Malmaison, France

4 Géotec, Eysines, France

5 CEREMA, Bron, France

** plegrand@ngefondations.fr*

RESUME : Dans le cadre de la révision de la norme NF P 94-282 Ecrans de soutènement pour la 2^{ème} génération des Eurocodes, un groupe de travail s'est réuni pour effectuer une analyse sur la prise en compte des effets de voûte mentionnée dans la norme actuelle pour quantifier les efforts résiduels à prendre en compte pour le dimensionnement des parements des parois discontinues.

L'analyse bibliographique a permis d'identifier les différentes méthodes utilisées dans la profession pour déterminer de manière analytique les effets de voûte et d'en définir les champs d'application au regard du mécanisme développé pour les parois discontinues. Elle a également permis de recenser les dernières études publiées afin de compléter les études déjà mentionnée dans la norme en application.

Afin de quantifier et valider les poussées résiduelles obtenues sur parement, les approches retenues ont par la suite fait l'objet de calculs paramétriques en fonction des caractéristiques des terrains en place, des hauteurs soutenues et des différents types de parements utilisés. Les résultats obtenus ont mis en évidence les limites d'application des différentes méthodes au regard de la hauteur soutenue et du caractère frottant ou cohérent des terrains en place.

Enfin, sur la base d'études antérieures, des calculs numériques complémentaires par modèle aux éléments finis 2D ont été réalisés pour proposer les diagrammes de poussées s'appliquant sur le parement.

ABSTRACT: As part of the revision of the French standard NF P 94-282 "Retaining walls" for the second generation of the Eurocodes, a working group was established to carry out an analysis on the consideration of soil arching effects mentioned in the current standard, with the objective of quantifying the residual earth pressures to be taken into account for the design of facing elements in discontinuous retaining walls.

The literature review made it possible to identify the different methods commonly used in practice to analytically evaluate soil arching effects and to define their respective ranges of application regarding the mechanisms involved in discontinuous retaining walls. It also allowed for a review of the latest published studies, complementing those already mentioned in the current version of the standard.

In order to quantify and validate the residual pressures acting on the facing, the selected approaches were subsequently applied through parametric analyses considering soil properties, retained heights and different types of facing systems. The results highlight the limitations of the various methods with respect to the retained height and the frictional or cohesive nature of the soil.

Finally, based on previous studies, additional numerical analyses using 2D finite element modelling were carried out to propose representative earth pressure diagrams acting on the facing.

Mots-clés : Parois discontinues ; Effets de voûte ; Parement ; Poussée

1 PRÉAMBULE

Dans le cas des soutènements discontinus, la vérification de la stabilité et de la résistance d'un écran composite conformément à la norme NF P 94-282 s'appuie sur la détermination de la poussée des terres au-dessus du fond de fouille selon des dispositions initialement établies pour les écrans continus plans.

Même si les effets de voûte peuvent se développer dans le sol entre les éléments principaux et conduire à une réduction de la poussée transmise au blindage, plus souple, le cadre normatif établi en 2009 ne permettait pas, en l'état des connaissances de retenir une poussée réduite sans justification expérimentale appropriée aux conditions du projet. Différents modèles de calcul (Graux, Kowalevski, effet silo, etc.) étaient néanmoins mentionnés pour l'estimation de la poussée du terrain.

Actuellement, les logiciels de calcul des soutènements permettent de déterminer une valeur de poussée sur l'écran qui est usuellement directement utilisée pour le dimensionnement des parements. Cette valeur fortement sécuritaire, conduit à un surdimensionnement des parements et peut aboutir parfois à des résultats peu représentatifs au regard des retours d'expérience. Elle pourrait être optimisée par la prise en compte explicite de l'effet de voûte.

Dans le cadre de la nouvelle génération des Eurocodes et de la révision de la norme NF P 94-282, un groupe de travail s'est constitué afin d'actualiser cet item au regard des différentes études venant compléter l'état des connaissances et analyser dans quelle mesure, la prise en compte d'un effet de voûte pouvait « normativement » être considérée.

Lorsqu'un report de poussée est considéré, il convient néanmoins de rappeler que la poussée globale retenue pour le dimensionnement de l'écran composite ne peut être inférieure à la poussée limite déterminée en l'absence d'effets de voûte et que ces derniers ne concernent pas les pressions interstitielles.

2 METHODES DE CALCUL

Le contexte normatif actuel (NF P 94-282) ne fournit pas de règles explicites de calcul des effets de voûte.

Seule la NOTE 2 de l'alinéa (1) de l'annexe B.3.7, fait explicitement référence à l'effet de voûte en citant notamment des ouvrages plus anciens de la littérature scientifique, tels que ceux du professeur et ingénieur Daniel Graux dans son ouvrage « *Fondations et excavations profondes tome 1 - Géotechnique appliquée* » publié en 1967. Ces effets sont décrits dans les paragraphes 2 à 6 du chapitre 8, intitulé « *Arcboutements et fouilles blindées* ». Les autres

modèles de calcul mentionnés dans la norme sont le modèle de Kowaleski et l'effet silo.

Le but de cette recherche bibliographique est donc d'identifier un modèle capable de déterminer la poussée réduite à appliquer entre les éléments porteurs, sur le blindage.

2.1 Recherche bibliographique

2.1.1 Les Arcboutements (Graux, 1967)

Dans son ouvrage, Daniel Graux décrit les effets de voûte comme des arcboutements, mettant en évidence leur rôle dans la redistribution des poussées entre les éléments porteurs d'un blindage.

Les arcboutements sont stables sous deux conditions : le déplacement des appuis doit être très limité et aucune action externe, physique ou mécanique, ne doit modifier la compacité ou l'enchevêtrement du terrain.

L'importance de ces arcboutements est liée, d'après Graux, aux caractéristiques géométriques de l'écran (espacements et formes des appuis), aux propriétés physiques et mécaniques du sol et aux dimensions des éléments constitutifs.

Des essais ont été effectués à l'institut Franzius à Hanovre pour déterminer et quantifier les effets d'ombre. Ils décrivent l'influence de pieux sur la poussée réellement appliquée à l'écran de soutènement. Une file de pieux était placée devant un écran afin de quantifier la réduction de la poussée de l'écran que la file protège. Ces essais ont été conduits avec un sol sableux.

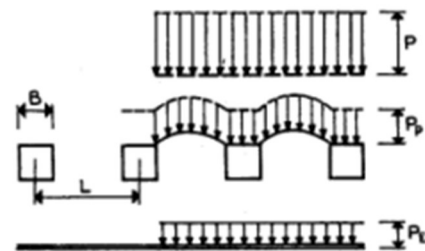


Figure 1. Effet d'ombre d'une file de pieux (Graux, 1967)

Les résultats des essais ont permis de déterminer les valeurs du facteur d'ombre en fonction du rapport entre la dimension transversale des pieux et leur entraxe. Une courbe de tendance des valeurs du tableau a été effectuée en Figure 2.

Lorsque B/L est supérieur à 0,5 (i.e. l'écart entre les bords des pieux est égal à la longueur transversale du pieu), l'effet d'ombre est total. Ce qui signifie que les pieux reprennent entièrement la poussée. Cependant, la prise en compte d'un tel effet sur le parement ne nous semble pas applicable dans toutes les configurations de sols et ne peut donc pas être

considérée comme sécuritaire d'un point de vue normatif.

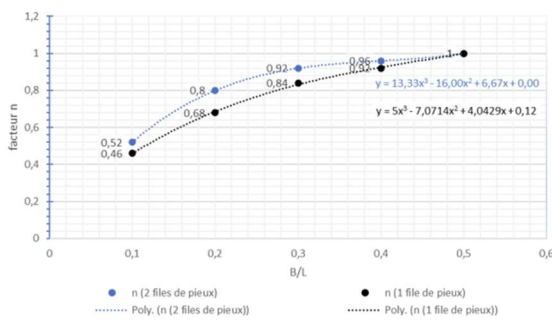


Figure 2. Facteur d'effet d'ombre en fonction du rapport entre le diamètre du pieu et l'espacement des pieux

2.1.2 Le coin de Kowalski

La théorie du coin de Kowalski permet en particulier d'expliquer la tenue des tranchées par effet voûte au sein d'un massif.

L'allure du glissement de terre à l'arrière de la tranchée peut se décomposer en deux parties comme indiquée en Figure 3. Une partie cylindrique parabolique à génératrice verticale et une autre partie en plan, formant un angle α avec l'horizontale et passant par le fond de fouille.

La géométrie ainsi décrite, bien que simplifiée, reste suffisamment représentative des surfaces de rupture réelles (Costet et al., 1983).

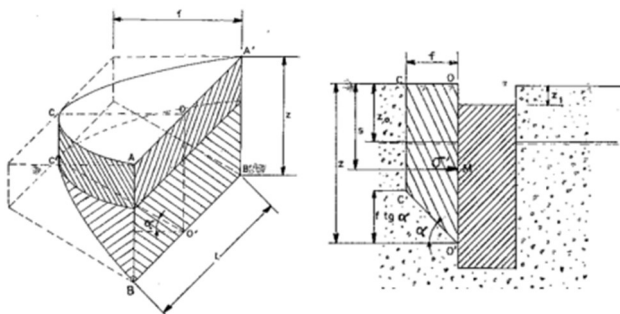


Figure 3. Schéma explicatif du coin de Kowalski avec les paramètres géométriques nécessaires (Costet et al., 1983)

Le calcul d'équilibre des résultantes des forces, dans le cas d'une tranchée remplie de bentonite permet de calculer la poussée exercée par le coin sur la tranchée. Cependant, les hypothèses effectuées par Kowalski restent discutables pour le cas d'application puisque la poussée des terres sur le coin n'est pas prise en compte. Cette hypothèse considère qu'au début du glissement (à l'état limite), il n'existe aucun contact entre le coin et le terrain le long de la surface de glissement. Or, elle n'est pas valable pour le calcul de la poussée résiduelle sur un parement rigide, en particulier.

2.1.3 Approches déterminant l'espacement maximal des pieux

De nombreux travaux scientifiques se sont intéressés à l'espacement maximal admissible entre les pieux en prenant en compte l'effet de voûte entre ces derniers. L'article de Li et al., 2020, se base sur plusieurs théories de calcul issues de la littérature.

L'article présente deux modèles reposant sur des hypothèses et des géométries différentes pour déterminer l'espacement maximal des pieux en tenant compte de l'effet de voûte du sol entre les pieux. Les résultats obtenus sont alors comparés avec ceux issus de la littérature.

Le premier modèle (Li et al., 2020) vérifie l'état d'équilibre du coin de sol à l'arrière du pieu qui supporte l'effet voûte (zone de compression triangulaire). Ce modèle permet de déterminer la valeur maximale de la distance entre pieux afin que l'effet de voûte soit repris au niveau « des pieds d'arche ».

Le second modèle (Li et al., 2020) vérifie l'état d'équilibre du pied de l'arche en appui latéral sur le pieu. Ce modèle permet de déterminer la valeur maximale de la distance entre pieux afin que l'effet de voûte soit repris par la résistance de frottement latéral sur le support.

Les valeurs obtenues dans la littérature sont très hétérogènes et les écarts sont considérables. Dans le cas de soutènements discontinus visés par l'étude, le premier modèle s'avère plus adapté pour prendre en compte d'un effet de voûte entre les pieux du fait de la largeur et géométrie de l'appui latéral.

2.1.4 L'effet silo (Approche de Perko et al., 2008)

Howard A. Perko et John J Boulden décrivent un modèle afin de calculer la poussée en se basant sur la théorie du silo.

Les hypothèses utilisées dans ce modèle considèrent que :

- l'effet de voûte dans le sol crée un demi-silo de forme circulaire derrière le mur ;
- la base du silo a une forme en coin (référence au coin de Kowalski) dont l'angle est approximativement de 45° , au lieu de la formule de Rankine $45^\circ - \phi/2$.

Un exemple de distribution de la pression latérale montre que la pression augmente avec la profondeur jusqu'à une valeur maximale, où le frottement sur le sol l'emporte sur la force motrice. La détermination de ce maximum permet de dimensionner les ouvrages.

Il est mentionné dans cette approche (Perko et al., 2008) que, d'après l'expérience, la pression exercée par le sol sur le mur entre les pieux est généralement constante avec la profondeur. Les excavations plus

profondes n'ont généralement pas besoin d'un mur plus épais ; les pieux de soutien doivent plutôt être renforcés afin de résister aux pressions latérales accrues du sol. Le modèle confirme ce phénomène.

Il est important de noter que ce modèle ne prend pas en compte la cohésion dans le sol.

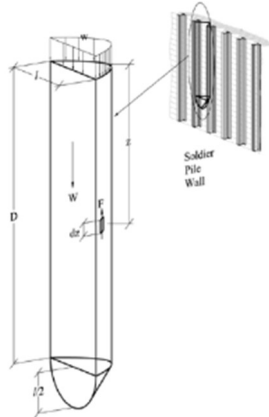


Figure 4. Schéma et paramètres géométriques du modèle - (Perko et al., 2008)

2.1.5 L'effet silo (Approche de Fen et al., 2023)

L'article de Fen et al., 2003 propose un modèle analytique combinant plusieurs solutions analytiques déjà établies par d'autres chercheurs, dont certaines sont décrites précédemment.

L'article s'inspire notamment du modèle de silo modifié proposé par Perko et Boulden, 2008. Le modèle établi par Fen et al., 2023 a pour but d'analyser la distribution de la pression du sol entre les pieux sur toute la profondeur. L'arc dans le sol est supposé avoir une forme parabolique et l'effet de l'angle de frottement interne est pris en compte au niveau du coin de glissement.

La pression des terres est déterminée pour chaque profondeur. L'article ne donnant pas le détail des calculs de la démonstration, la reprise complète des calculs a été réalisée afin de vérifier les résultats obtenus.

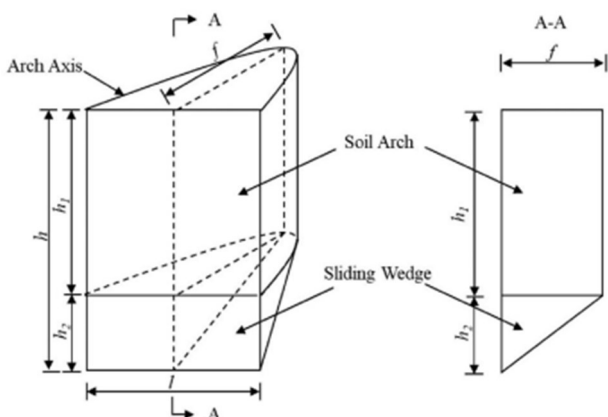


Figure 5. Schéma et paramètres géométriques du modèle analytique (Fen et al., 2023)

La valeur de poussée est déterminée séparément pour la partie de sol dite de l'arc présentée et la partie de sol du coin de glissement (Figure 6). Elle complète l'approche de Perko et al., 2008 en intégrant, dans le calcul de la poussée l'effet de la cohésion.

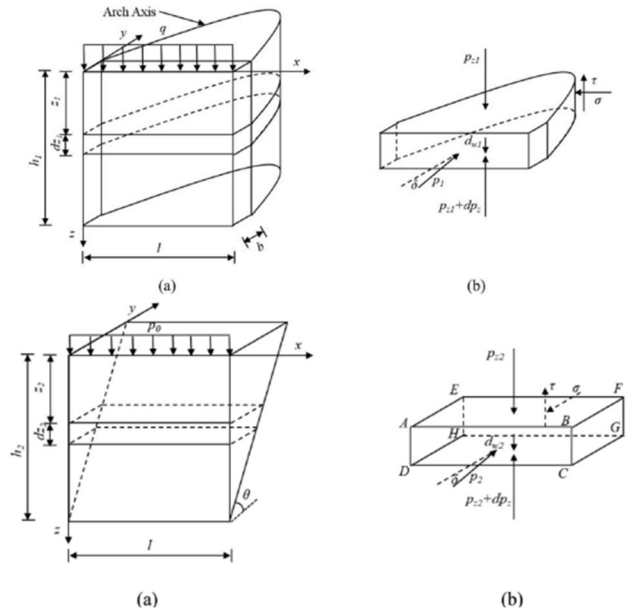


Figure 6. - Modèle analytique de l'arc et du coin de glissement : (a) paramètres géométriques et système de coordonnées ; (b) élément infinitésimal d'une tranche (Fen et al., 2023)

2.2 Autres approches

Dans le cadre du groupe de travail, d'autres approches ont également été présentées.

L'effet silo de Janssen (1895) traduit l'effet de voûte vertical se développant contre les parois d'un silo, où le frottement entre les grains limite la pression exercée sur la base du silo. En 2015, Simonnot a également repris ce principe dans le cas de mur de soutènement à proximité d'une autre paroi ou d'un massif rocheux sain.

En 1964, la théorie de Schneebeli a permis d'expliquer le phénomène d'effet de voûte, directement applicable aux tranchées des parois moulées. Dans la tranche verticale de terrain constituant la paroi longitudinale de la tranchée, un arc se forme et s'appuie sur le terrain confiné aux extrémités des panneaux. Un report de charge s'effectue soulageant ainsi les arcs inférieurs. La contrainte σ_3 s'en trouve ainsi inférieure par rapport à l'intensité classique de la poussée de terre.

Bien que couramment utilisée pour justifier la stabilité des tranchées sous boue, ces approches n'ont pas été retenues pour justifier les effets de voûte des soutènements des parois discontinues, en raison de la rigidité des appuis des arcs. En effet, la théorie des arcs verticaux se base sur un transfert de charge sur des

appuis confinés, ce qui n'est pas exactement le cas des pieux, qui se déplacent vers la fouille. Pour des soutènements rigides en revanche, de telles approches peuvent être prises en compte.

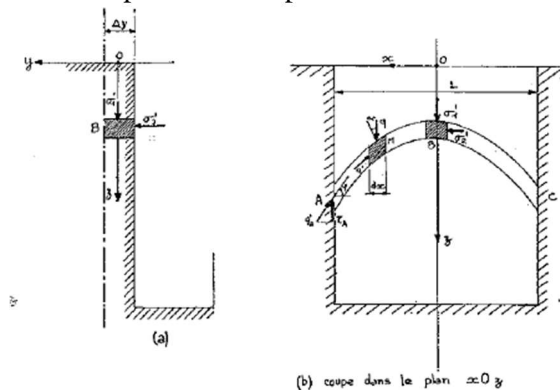


Figure 7. – Théorie de Schneebeli (Costet et al. 1983)

2.3 Comparaison et discussion

Afin de retenir un modèle de calcul adapté à la problématique, une comparaison des modèles de Fen et al., 2023, Perko et al., 2008, et Graux, 1967 a été réalisée. Ces résultats ont également été comparés à la valeur de poussée obtenue via le calcul RIDO ainsi qu'à la poussée minimale recommandée par la norme NF P 94 282.

Les calculs ont été réalisés en utilisant différents paramètres géotechniques et des hauteurs vues usuelles de l'ordre de 3 m et 6 m pour ce type de soutènement. Les paramètres retenus sont présentés dans le Tableau 1. D'autres calculs paramétriques ont également été effectués pour d'autres variables, telles que l'angle de frottement, les espacements et diamètres des pieux.

Tableau 1. Paramètres d'entrée de l'exemple de comparaison des différents modèles retenus

Caractéristique du sol (1 seul horizon)	ϕ	28	°
	c	0 ou 5	kPa
Surcharge en tête	γ	18	kN/m ³
Epaisseur/largeur du profilé	q	0	kPa
Espacement entre pieux	b	0,5	m
Entre axe des pieux	l	1	m
Hauteur de soutènement	l + b	1,5	m
	h	3 ou 6	m

Les valeurs obtenues avec les différentes méthodes sont présentées et comparées dans les graphiques suivants (Figures 8, 9 et 10).

Les valeurs de poussée obtenues avec les méthodes retenues sont logiquement plus faibles.

La valeur du modèle de Graux, déduite par interpolation des résultats expérimentaux, est très faible et semble peu utilisable à proximité de la surface. En effet, à faible profondeur, le confinement vertical est insuffisant pour permettre le développement complet de l'effet de voûte, et une rupture par glissement devient alors dimensionnante.

Ce type de rupture est plutôt bien appréhendé par les approches de Perko et al., 2008 ou Fen et al., 2023. Il en résulte une pression sur le parement proche de la poussée des terres, avec un faible report de charge par l'effet de voûte.

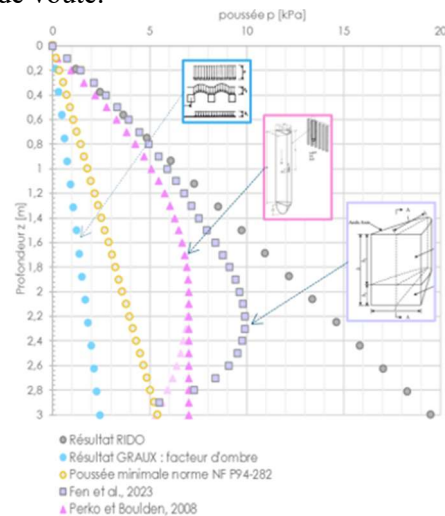


Figure 8. Graphe des valeurs de poussée en fonction de la profondeur pour une hauteur de soutènement de 3 m et un sol sans cohésion

Sur la hauteur vue, en particulier lorsque celle-ci augmente (Figure 9), l'effet de voûte se développe progressivement, avec une valeur de poussée qui plafonne ensuite en profondeur (Perko et al., 2008) ou augmente légèrement (Fen et al., 2023). Ce comportement est cohérent avec la notion d'effet de voûte, et un parallèle peut être établi avec le calcul des poussées dans le cas des fouilles étroites.

En fond de fouille, en raison des conditions aux limites du parement, la poussée résiduelle attendue sur celui-ci est réduite à zéro. Le modèle de Fen et al., 2023 permet de bien reproduire ce phénomène, avec une diminution de la poussée résiduelle. Usuellement, cette réduction de poussée n'est cependant pas prise en compte dans le dimensionnement du parement, car elle ne présente pas de pertinence économique.

La figure 10 présente un cas de calcul dans lequel une cohésion de 5 kPa a été prise en compte ; seule l'approche de Fen et al., 2023 permet de la prendre en compte.

Les calculs présentés montrent que les hypothèses et modèles employés dans les différentes méthodes conduisent à des résultats qui varient fortement.

Le modèle de Perko et al., 2008 permet de produire un modèle de calcul représentatif de l'effet de voûte, et les améliorations apportées par Fen et al., 2023 permettent de prendre en compte plusieurs paramètres de sol, tels que la cohésion et l'angle de frottement, mais aussi des paramètres externes aux sols, comme la surcharge en tête du mur.

Ce dernier modèle offre une flexibilité dans le choix des paramètres de sol, permettant ainsi une

meilleure adaptation aux problématiques de calcul de la poussée sur le blindage entre les pieux. De plus, la démonstration des calculs est explicitement décrite et peut être partiellement réutilisée.

Enfin, les résultats obtenus apportent une optimisation significative sur la poussée sur le blindage, sans pour autant être trop favorable, en cohérence avec les différents retours d'expérience disponibles au sein du groupe de travail.

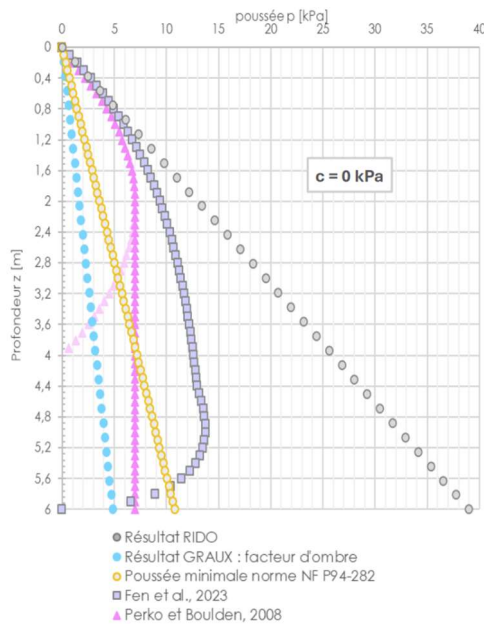


Figure 9. Graphe des valeurs de poussée en fonction de la profondeur pour une hauteur de soutènement de 6 m et un sol sans cohésion

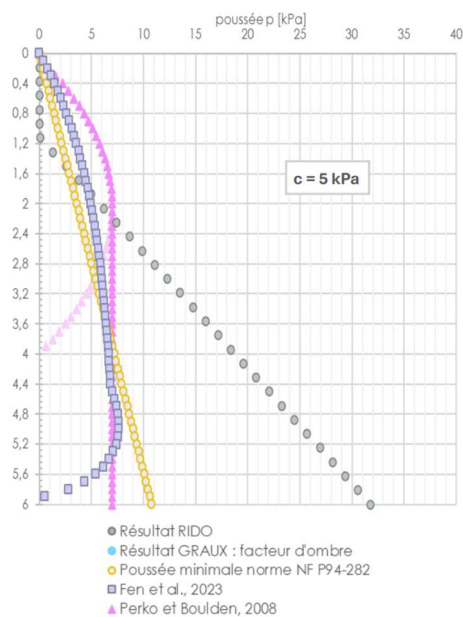


Figure 10. Graphe des valeurs de poussée en fonction de la profondeur pour une hauteur de soutènement de 6 m et un sol cohésif

2.4 Compléments

Le modèle de Fen et al., 2023 a été amélioré afin de corriger certaines limitations de l'approche originale :

- correction des erreurs repérées dans la publication (une erreur dans la formule de p_2 a été repérée pour l'expression de $(h - z_2)$),
- adaptation du modèle pour prendre en compte un multicouche,
- rétablissement de la continuité des valeurs de poussées entre le modèle en arche (effet de voûte) et le modèle du coin de glissement (base).

Des calculs paramétriques réalisés sur l'espacement des pieux ont également mis en évidence les limites de l'approche lorsque l'espacement devient trop important.

Dans ces configurations, une attention particulière doit être portée au transfert de charge dans la voûte et la capacité du terrain à encaisser cette pression.

A cet effet, l'approche proposée par Chen et al., 2020 permet de vérifier, au regard de la pression développée par l'effet de voûte, les conditions d'appuis de l'arc selon un critère de Mohr Coulomb pour une compression uniaxiale.

Ce modèle ne considère aucun blindage entre les pieux, il ne traite que l'effet de voûte. Dans le modèle de Fen et al., 2023, on considère que l'effet de voûte est présent et que la poussée sur le parement (la poussée calculée) correspond à la pression du sol situé entre l'arc et le parement.

3 PRISE EN COMPTE POUR LE DIMENSIONNEMENT DES PAREMENTS

Les méthodes de calculs présentées sont établies sur la base d'un calcul à la rupture.

La validité de l'approche de Fen et al., 2023 reste conditionnée par le niveau de déformation atteint dans le terrain. Ce niveau de déformation est associé, d'une part, au déconfinement du terrain avant mise en œuvre du blindage et, d'autre part, à la rigidité du blindage mis en œuvre.

Afin de vérifier ces impacts, une étude complémentaire a été réalisée à l'aide d'une modélisation 2D par éléments finis.

Le modèle retenu est un modèle plan intégrant un champ de contrainte de type « Field stress », avec une contrainte σ'_3 de 36 kPa prise en compte (Figure 11).

Des pieux de diamètres 520 mm ont été modélisés sous forme d'éléments volumiques, avec un espacement de 1,5 m ou 3 m. Une interface a été intégrée sur le périmètre des pieux.

Les blindages ont été modélisés par des éléments plaques, avec une condition de liaison au niveau des pieux de type articulée pour les blindages bois et encastree pour le béton projeté.

Au droit de chaque pieu, un déplacement imposé ou un point de force peuvent être appliqués, permettant ainsi de prendre en compte la rigidité verticale de l'élément ou son déplacement calculé dans le dimensionnement du soutènement.

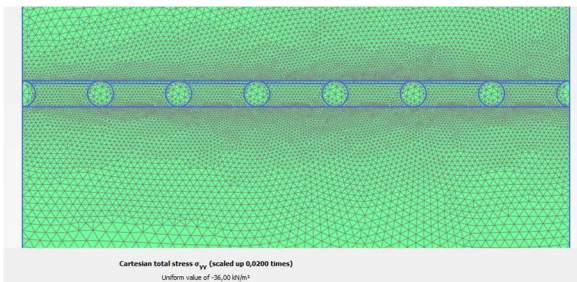


Figure 11. Modèle PLAXIS 2D plan

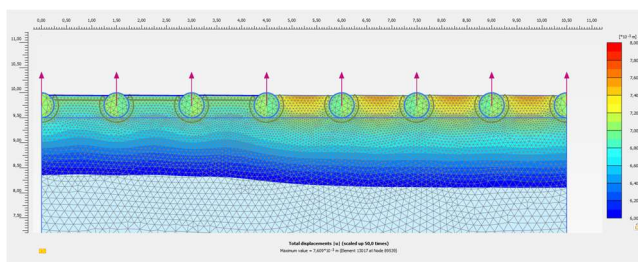
3.1 Effort sur le parement et influence de la rigidité du parement

Afin de déterminer la pression sur le parement, le phasage de calcul suivant est retenu (Figure 12) :

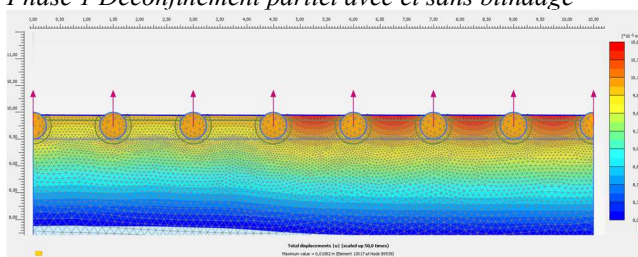
- excavation côté fouille avec limitation du taux de déconfinement, sans mise en place du blindage,
- mise en place du blindage et déconfinement total du terrain en place.

Pour chaque configuration, un calcul est également effectué en mettant en place directement le blindage avant excavation, sans prendre en compte de déconfinement.

Cette approche permet d'observer ainsi l'impact du déconfinement d'une part, et l'impact de la rigidité du parement d'autre part.



Phase 1 Déconfinement partiel avec et sans blindage



Phase 2 Déconfinement total avec blindage
Figure 12. Exemple de résultat de calcul

Lorsque le blindage est mis en place sans prendre en compte de déconfinement, on constate (Tableau 2) :

- peu de réduction de poussée sur un parement rigide (béton projeté de 15 cm d'épaisseur),
- une réduction de poussée de l'ordre de 50% sur un parement souple (blindage bois de 6 cm d'épaisseur).

Ces calculs montrent qu'en l'absence de déformation différentielle entre les pieux et le parement (cas de plaques rigides mises en œuvre préalablement au terrassement), il n'y a pas de réduction de poussée.

Tableau 2. Valeur de pression sur parement obtenues en fonction du parement et du déconfinement

	Blindage		Approche de Fen et al.
	BP 15cm	Bois 6cm	
Poussée initiale	36 kPa	36 kPa	36kPa
Poussée après déplacement du soutènement	15 kPa	13 kPa	
Poussée sur parement sans prise en compte d'un déconfinement	12,5 kPa	3,7 kPa	13kPa
Poussée sur parement avec prise en compte d'un déconfinement	5,8 kPa	2,5 kPa	

L'approche de Fen et al., 2023 donne un résultat de calcul qui reste sécuritaire par rapport aux valeurs obtenues via ces modèles aux éléments finis.

3.2 Détermination du diagramme de poussée

La modélisation effectuée met également en évidence des diagrammes de poussée qui varient en fonction de la rigidité du parement et du type de liaison au pieu.

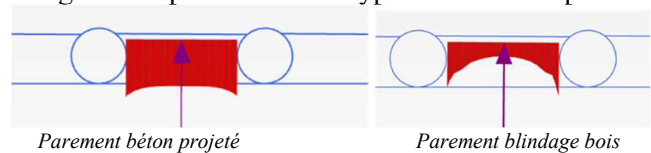


Figure 13. Diagramme de pression sur le parement en fonction de sa rigidité et liaison

Dans le cas d'un parement rigide encastree, le diagramme reste rectangulaire. Dans le cas d'un parement souple articulé, le diagramme de pression est trapézoïdal, avec concentration des efforts au droit des appuis plus rigides.

A noter que, du fait des conditions de liaison différentes, le moment obtenu en travée reste, au final, d'un même ordre de grandeur.

Cette étude est complétée par des approches aux éléments finis sur PLAXIS 2D et 3D réalisées antérieurement, qui ont permis de mieux comprendre l'influence de l'effet de voûte non seulement sur la poussée appliquée au blindage mais aussi sur le moment de flexion dans le parement.

La revue scientifique « Journal of civil engineering and urbanism » a publié un article traitant ce sujet, intitulé « Optimization the Distance between Piles in Supporting Structure Using Soil Arching Effect » des auteurs S. Hosseinian et M. Cheraghi Seifabad. L'étude montre que le modèle de contrainte horizontale présente la même tendance pour toutes les

profondeurs pour des espacements de 2 m et de 4 m (Figure 14, Hosseinian et al., 2013).

Les pressions horizontales calculées entre deux pieux à différentes profondeurs à l'aide des méthodes numériques sont très proches l'une de l'autre. En revanche, dans les méthodes classiques, la pression entre deux pieux augmente avec la profondeur.

L'approche de Fen et al., 2023 tient compte d'une légère augmentation de la pression avec la profondeur. Elle reste donc cohérente avec ces observations, et cette hypothèse reste une approche prudente dans l'état actuel des connaissances.

Ces modélisations mettent également en évidence la concentration des contraintes autour des pieux, et l'effet de voûte est identifié dans le sol à l'arrière du mur. Les valeurs obtenues avec PLAXIS 3D sont comparées, pour l'espacement de 2 m entre les pieux, avec le diagramme de réduction des pressions établi par MacNab, 2002 présenté en Figure 15.

