

Etude sur le comportement et les interactions des murs étagés

Behaviour and interactions of multi-level retaining walls

Khoa Van NGUYEN^{1*}, Clément PRUD'HON¹, Maxime FONTY², Loïc LEURENT³, Pascal AGUADO⁴,
Christopher CAPLANE⁵, Thomas LE COR⁶

1 Terrasol, Paris, France

2 Solétanche-Bachy, Rueil-Malmaison, France

3 Cerema, Haubourdin, France

4 Geotec, Plaisir, France

5 Fondasol, Avignon, France

6 NGE Fondations, Noyal-sur-Vilaine, France

**khoavan.nguyen@setec.com*

RESUME : Dans le cadre de la révision de la norme NF P94-281 « Murs de soutènement » pour la 2^{ème} génération des Eurocodes, un groupe de travail s'est réuni pour analyser le sujet des murs étagés en interaction dans le but d'établir des recommandations. Le présent article rend compte de ce travail et explicite les mécanismes et niveaux d'interaction entre murs, ainsi que l'origine de certaines propositions formulées par le groupe de travail. Les analyses réalisées se basent sur des calculs cinématiques à la rupture, pour étudier les effets d'interaction sur le mécanisme de poussée sur le mur aval, et sur des calculs aux éléments finis, pour étudier les mécanismes de portance du mur amont. Il est montré que les interactions entre murs peuvent modifier significativement la stabilité générale ainsi que les efforts et les déplacements des murs. Ces analyses mettent en évidence qu'il n'est pas admis, pour le calcul de poussée sur le mur aval, de considérer le mur amont comme une simple charge verticale appliquée à la surface d'un terrain horizontal. En conclusion, il est formulé des recommandations pour déterminer la distance entre murs à partir de laquelle l'interaction doit être considérée et sur les méthodes de calcul à mettre en œuvre selon les différents niveaux d'interaction.

ABSTRACT: As part of the revision of the standard NF P94-281 "Retaining Walls" for the second generation of Eurocodes, a working group met to analyse and make recommendations on the topic of multi-level retaining walls. This article reports on that work and first explains the mechanisms and interaction between walls, as well as the origin of certain proposals formulated by the working group. The analyses used the kinematic yield design to study the interaction effects on the active pressure on the downstream wall, and the finite element computations to study the bearing capacity of the upstream wall. It is shown that the interactions between walls can significantly modify overall stability as well as the internal forces and displacements of both walls. These analyses highlight that, for calculating the active pressure on the downstream wall, it is not acceptable to consider the upstream wall as a simple vertical load applied to the surface of a horizontal terrain. Recommendations are given for determining the distance between walls beyond which interaction must be considered in design studies, and for the calculation methods to be used for the different levels of interaction.

Mots-clés : Mur de soutènement ; interaction ; poussée ; portance ; Eurocode

1 INTRODUCTION

Deux murs en interaction sont dits étagés lorsque le volume de terrain sous la fondation du mur amont et le volume de terrain derrière le mur aval interfèrent, sans contact direct entre les murs. Les interactions dues à l'interférence de ces volumes de terrain concernent d'une part les mécanismes de rupture et d'autre part les schémas de diffusion de charges notamment depuis le mur amont vers le mur aval.

La poussée ou la capacité portante de la fondation d'un mur ne sont pas des propriétés locales du massif,

car elles sont dépendantes de la mobilisation de la résistance au cisaillement du terrain dans un certain volume. Ce volume dépend, entre autres, de l'interaction entre des murs proches.

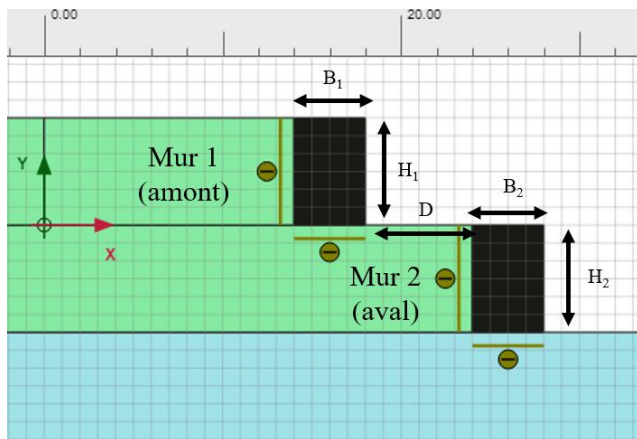
L'objet de cet article est de présenter les résultats du groupe de travail qui ont permis de formuler des propositions quant aux éléments de conception, de dimensionnement et de calcul pour les murs en interaction de type étagés, et notamment la distance entre murs à partir de laquelle les interactions pouvaient être négligées.

2 METHODOLOGIE D'ETUDE

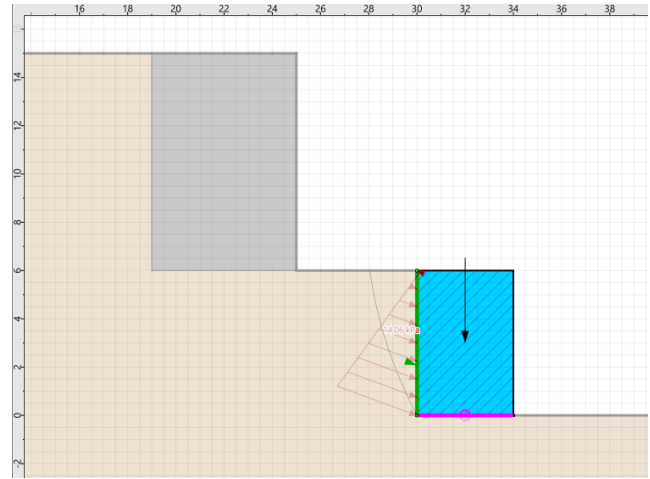
Une étude paramétrique a été réalisée pour deux murs poids étagés construits sur un massif homogène de caractéristiques suivantes : poids volumique $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, cohésion c' variant de 0 kPa à 20 kPa et angle de frottement interne ϕ' variant de 20° à 35° . Les dimensions des murs (hauteur H et largeur B) varient dans les gammes courantes $H = [3\text{m}, 9\text{m}]$ et $B = [2\text{m}, 6\text{m}]$ en gardant le rapport $B/H = 0.6$. La distance D entre les murs varie de 2m à 15m (distance limite à partir de laquelle l'interaction entre les murs devient négligeable).

Deux approches de calcul ont été employées : calcul aux éléments finis, à l'aide du logiciel Plaxis 2D, et calcul cinématique à la rupture (spirales logarithmiques), à l'aide du logiciel Talren v6 (Figure 1). Dans tous les calculs, les murs sont modélisés comme des massifs élastiques et rigides. Les calculs aux éléments finis, avec l'utilisation d'un critère de rupture de type Mohr Coulomb, permettent d'estimer l'impact des déformations et la diffusion des contraintes en milieu élasto-plastique. Pour les cas examinés où peu de zones plastiques se développent, la diffusion des contraintes dans le massif est proche à de celle en milieu élastique, obtenue par le modèle de Boussinesq. Les calculs cinématiques à la rupture, en considérant des surfaces de rupture constituées de successions d'arcs de spirales logarithmiques de même pôle (Salençon, 1983), permettent de vérifier la stabilité générale des murs et d'estimer la diffusion de contraintes par la théorie de la plasticité. Ainsi, les résultats et les conclusions de ces deux approches se complètent.

Notons que les terrassements nécessaires à la construction des murs et leur impact potentiel ne sont pas considérés dans la présente étude qui ne s'intéresse qu'aux interactions des murs dans la géométrie finale.



a) Modèle Plaxis avec : $H_1=6\text{m}$, $B_1=4\text{m}$, $H_2=6\text{m}$, $B_2=4\text{m}$, $D=6\text{m}$



b) Modèle Talren avec : $H_1=9\text{m}$, $B_1=6\text{m}$, $H_2=6\text{m}$, $B_2=4\text{m}$, $D=5\text{m}$

Figure 1. Exemple des modèles de calcul Plaxis et Talren

3 MECANISMES D'INTERACTION

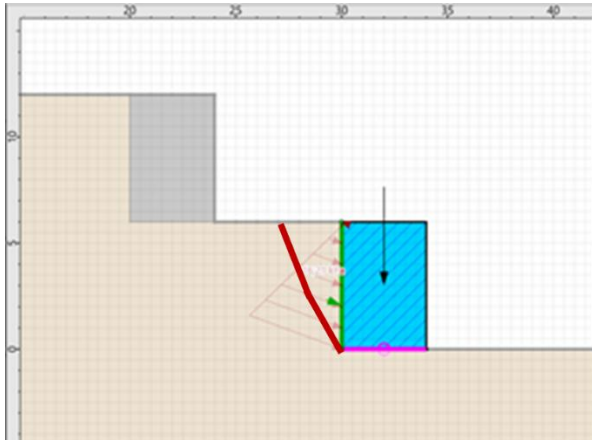
3.1 Poussée sur le mur aval

3.1.1 Approche analytique

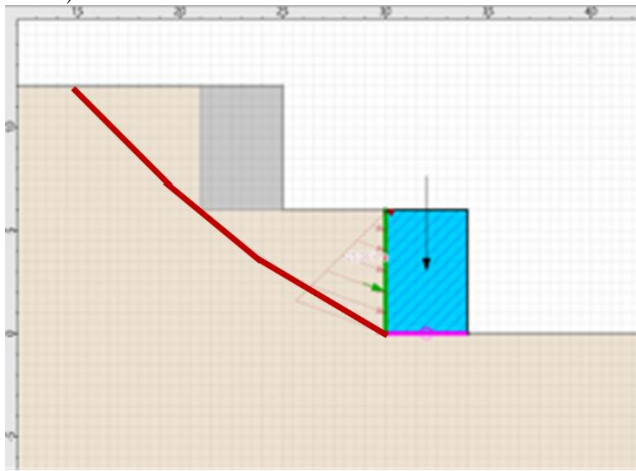
Une approche analytique a été menée à partir de la théorie de Coulomb par le même groupe de travail (Nguyen et al., 2025). Il est montré qu'il ne suffit pas que la surcharge, apportée par le mur amont, soit située au-delà du 'coin de Coulomb' pour que celle-ci n'ait pas d'influence sur le mur aval. Plus l'intensité de la surcharge est forte, et plus celle-ci doit être éloignée de l'écran pour ne pas influencer le calcul de la poussée sur le mur.

3.1.2 Approche cinématique,

La Figure 2 présente les calculs de type Talren (calcul cinématique à la rupture) de la poussée sur le mur aval en présence du mur amont avec deux distances D , en considérant l'exemple : $H_1=H_2=6\text{m}$, $B_1=B_2=4\text{m}$, $\phi = 30^\circ$, $c=0 \text{ kPa}$. A 6m de distance, la résultante de poussée est de 91.3 kN/ml (similaire à celle estimée par les tables de Kérisel-Caquot) et le volume de sol mobilisé derrière le mur aval est identique au coin de poussée de Coulomb. A 5m de distance, la résultante de poussée devient plus importante (141.2 kN/ml), et le volume de sol mobilisé derrière le mur aval croît jusqu'à venir envelopper également un volume de sol derrière le mur amont. Ce calcul montre que la présence du mur amont est susceptible d'accroître fortement la poussée des terrains s'exerçant sur le mur aval, et que le volume de terrain associé à cette poussée peut être significativement augmenté, ceci en fonction de la distance entre les murs.



a) $D=6m$



b) $D=5m$

Figure 2. Exemple de l'extension du volume de poussée sur le mur aval pour 2 distances entre murs. Cas examiné : $H_1=H_2=6m$, $B_1=B_2=4m$, $\phi = 30^\circ$, $c=0$ kPa.

D'une manière générale, la valeur de la poussée sur le mur aval augmente en fonction de la réduction de la distance D entre les murs ; la poussée sur le mur aval n'évolue plus et devient égale à celle sur un mur isolé lorsque la distance D est suffisamment importante. La Figure 3 présente l'évolution de la poussée aval en fonction de la distance D , en considérant : sol $\phi' = 30^\circ$, $c'=0$ kPa ; mur aval $H_2=6m$, $B_2=4m$; mur amont de différentes dimensions $H_1=3m-6m-9m$, et respectivement $B_1=2m-4m-6m$. Les valeurs de poussée F sont normalisées avec celle d'un mur isolé F_0 ; et les distances D sont normalisées avec la hauteur du mur aval H_2 . Les résultats pour différentes dimensions du mur amont montrent une même tendance et confirment le résultat ci-avant : la poussée normalisée F/F_0 augmente (jusqu'à une valeur de 4 dans l'exemple étudié, voire plus) lorsque la distance D/H_2 diminue ; elle devient égale à 1 lorsque $D/H_2 > 1$ (la distance limite A_v est égale à 1 pour ces cas examinés). Cette poussée F/F_0 augmente évidemment, lorsque la hauteur du mur amont H_1

augmente. La Figure 4 présente également l'évolution de la poussée aval F/F_0 en fonction de la distance D/H_2 , mais pour des sols de différentes résistances ($\phi = 20^\circ-25^\circ-30^\circ-35^\circ$, $c=0$ kPa), en gardant les mêmes dimensions des murs ($H_1=H_2=6m$, $B_1=B_2=4m$). La tendance de l'évolution de F/F_0 en fonction de D/H_2 est également confirmée par ces tests. Il est montré également que moins le sol est résistant (ϕ faible), plus la poussée F/F_0 augmente, et plus la distance limite A_v augmente (jusqu'à environ $1.7 H_2$).

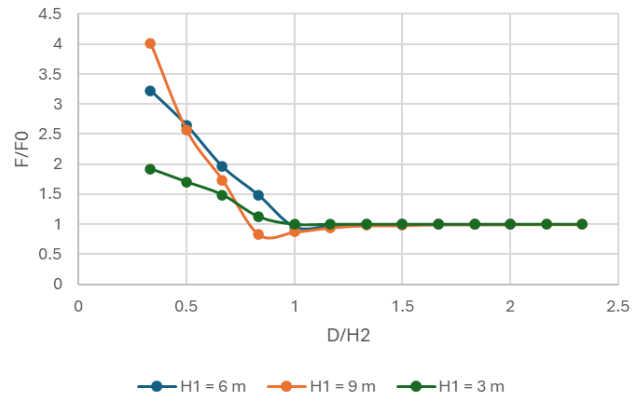


Figure 3. Variation de la poussée sur le mur aval en fonction de la distance entre murs. Cas examinés : $H_1=3m-6m-9m$, $B_1=2m-4m-6m$, $H_2=6m$, $B_2=4m$, $\phi = 30^\circ$, $c=0$ kPa.

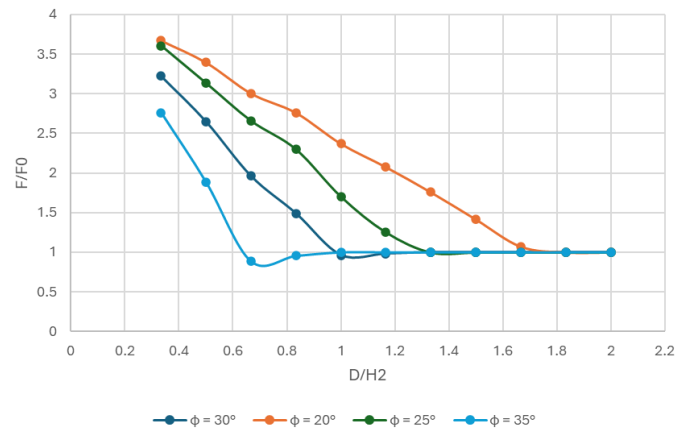


Figure 4. Variation de la poussée sur le mur aval en fonction de la distance entre murs. Cas examinés : $H_1=H_2=6m$, $B_1=B_2=4m$, $\phi = 20^\circ-25^\circ-30^\circ-35^\circ$, $c=0$ kPa.

3.2 Portance des murs

L'estimation de la capacité portante d'une fondation par la théorie de la plasticité a été bâtie à partir des travaux réalisés par (Prandtl, 1920) et (Reissner, 1924). Une revue de l'évolution de cette méthode, apportée par de nombreux auteurs, est présentée par (Van Baars, 2015). Dans la majorité des études réalisées, seule la portance est calculée, le volume du sol mobilisé sous la fondation (couramment appelé « coin de Prandtl ») est rarement abordé. L'extension

de ce volume, qui dépend de la résistance du sol de fondation et aussi des sollicitations sur la fondation, peut être estimée par l'approche analytique, mais également par la méthode numérique aux éléments finis, en particulier pour des cas complexes. La Figure 5 illustre l'équivalence des résultats obtenus par la méthode numérique et la méthode analytique pour des cas simples. Elle montre aussi la variation de l'extension latérale du coin de Prandtl (A_m) en fonction de la charge sur la fondation : Sur l'exemple étudié, $A_m \sim 1.5 B$ ($B =$ largeur de la fondation) pour une charge verticale centrée, et $A_m \sim B$ pour cette charge inclinée.

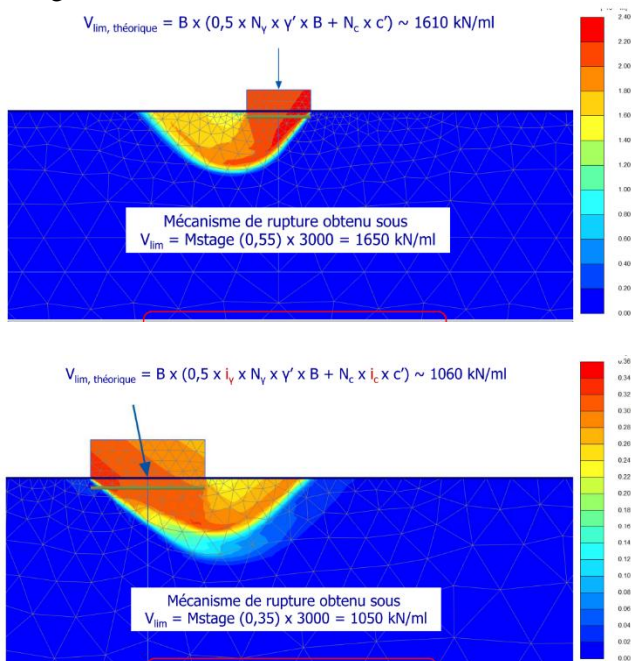


Figure 5. Charge limite et volume de sol mobilisé sous une fondation soumis aux charges verticales et inclinées.

Pour estimer la gamme de A_m sous la fondation d'un mur de soutènement, une étude paramétrique avec des calculs Plaxis 2D a été réalisée, prenant en compte l'effet de la charge horizontale et du moment en plus de la composante verticale. La fondation du mur est modélisée par un élément de plaque rigide. La charge sur la fondation est progressivement augmentée jusqu'à obtenir une non-convergence du calcul, qui correspond à la rupture du sol sous la fondation. D'une manière générale, le volume de sol mobilisé doit être corrélé avec la portance de la fondation. Ce postulat a été confirmé par l'étude réalisée :

- Avec l'effet de la charge horizontale et du moment, la portance de la fondation est réduite, le volume de sol mobilisé l'est aussi.
- L'augmentation (à l'inverse la diminution) de la résistance au cisaillement du sol (cohésion ou angle

de frottement) augmente (à l'inverse diminue) la portance et également le volume de sol mobilisé, mais dans une certaine limite plafonnée.

A titre d'exemple, la Figure 6a présente, le cas d'un mur $H=6m$, $B=4m$ sur un sol résistant ($\phi = 30^\circ$, $c=20 \text{ kPa}$) où $A_m \sim 1.2 B$ ($A_m \sim 0.75 B$ lorsque $c=0 \text{ kPa}$ pour une même valeur de ϕ). A titre de comparaison, la Figure 6b présente le cas d'un même mur sur un sol peu résistant ($\phi = 20^\circ$, $c=0 \text{ kPa}$) où $A_m \sim 0.45 B$.

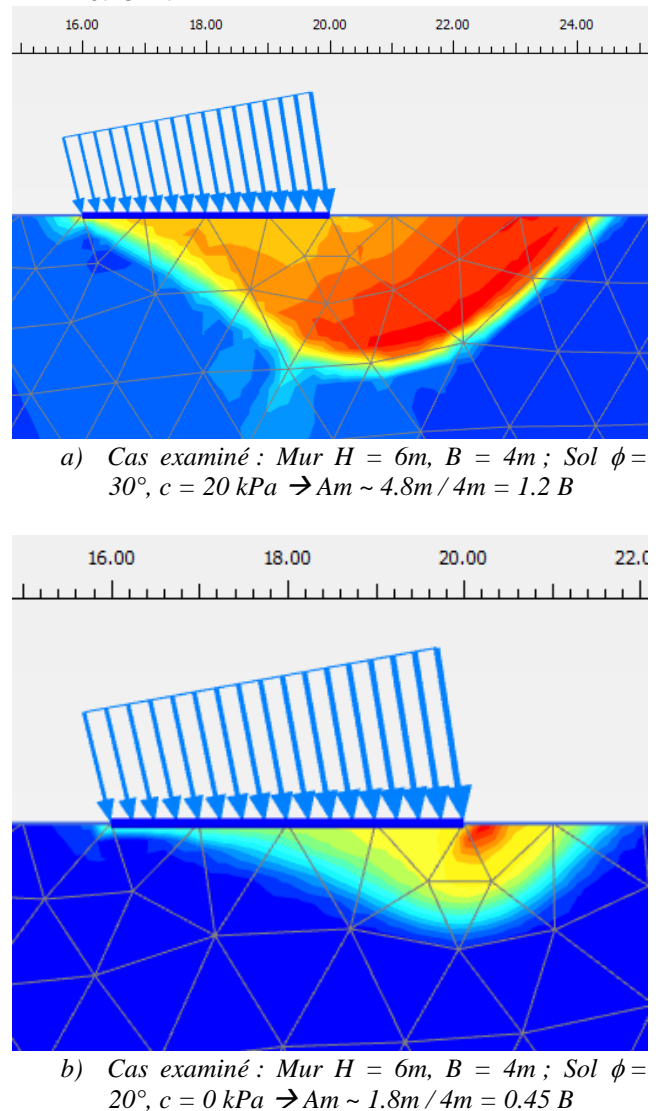


Figure 6. Exemple de l'extension du volume de sol mobilisé sous la fondation d'un mur de soutènement.

4 INTERACTIONS ENTRE MURS

4.1 Impact du mur amont sur le mur aval

4.1.1 Effet sur la poussée exercée

Comme discuté dans le paragraphe 3.1, la présence proche d'un mur amont peut accroître fortement la poussée sur un mur aval. En effet, le torseur d'efforts à la base de la fondation du mur amont (l'effort

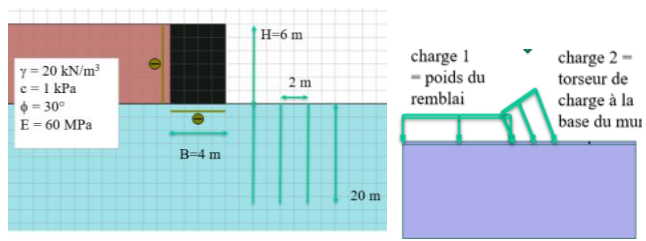
vertical, le moment et, en particulier, l'effort horizontal) peut augmenter significativement cette poussée. Pour évaluer l'impact de chaque composante de ce torseur sur la diffusion des contraintes horizontales dans le sol, des calculs Plaxis (Figure 7) ont été réalisés pour un cas particulier (mur H=6m, B=4m ; sol $\phi = 30^\circ$, $c=0$ kPa). L'augmentation, induites par le mur amont, des contraintes horizontales dans le sol à différentes distances et profondeurs du mur aval est évaluée par 4 types de calcul :

- Calcul 1 : Le mur et le sol amont sont modélisés (Figure 7a à gauche).
- Calcul 2 : Le mur et le sol derrière sont modélisés comme de simples surcharges linéaires verticales.
- Calcul 3 : Le mur est modélisé par un torseur complet (3 composantes) à la base, estimé au préalable par un calcul classique type Mur. (Figure 7a à droite)
- Calcul 4 : idem calcul 3, sans la composante horizontale du torseur (calcul test pour évaluer l'impact de la composante horizontale)

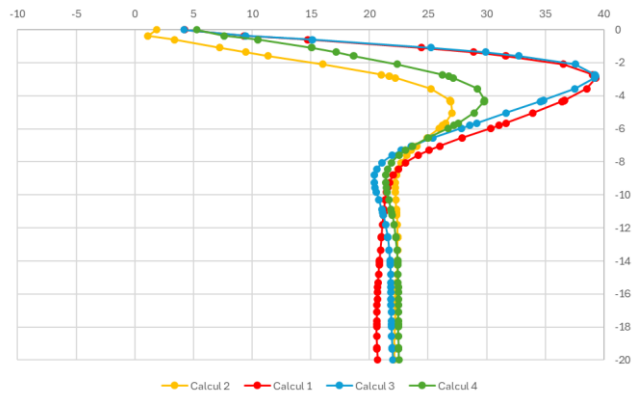
Les résultats de ces calculs, présentés sur la Figure 7b/c), mettent en évidence :

- En comparant avec les résultats du calcul 1 (calcul de référence), les contraintes évaluées par le calcul 2 sont largement sous-estimées, en particulier pour de faibles distances entre murs (interaction forte entre les murs).
- Les résultats du calcul 3 sont très proches de ceux du calcul 1, les écarts étant faibles.
- Le calcul 4, avec la prise en compte de l'effet de moment de basculement « corrige » légèrement le calcul 2. Cependant, les résultats de ce calcul 4 sont encore éloignés des résultats des calculs 1 & 3.

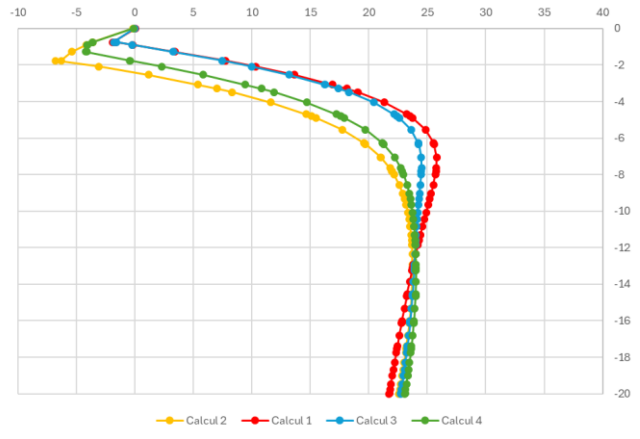
Ces éléments montrent qu'il est indispensable de prendre en compte le torseur d'efforts à la base du mur amont, en particulier la composante horizontale, pour estimer correctement la valeur de la poussée sur le mur aval.



a) Modèle Plaxis calcul 1 et Schéma calcul 3



b) Contraintes horizontales (kPa) à 2m du mur



c) Contraintes horizontales (kPa) à 6m du mur

Figure 7. Diffusions de la contrainte verticale en profondeur à différentes distances d'un mur de soutènement selon différentes hypothèses de calcul.

Dans les calculs réalisés précédemment, la diffusion de la contrainte dans les calculs Plaxis est proche de celle d'un modèle de type Boussinesq dans un milieu élastique (peu de zones plastiques développées). Pour vérifier cette conclusion selon la théorie de la plasticité, des calculs cinématique à la rupture, ont été réalisés, sous le logiciel Talren, pour ce même exemple (murs $H_1=H_2=6m$, $B_1=B_2=4m$; sol $\phi=30^\circ$, $c=0$ kPa ; $D=5m$). La poussée sur le mur aval est estimée par 2 calculs :

- Calcul 1 (Figure 8a) : Les murs sont explicitement modélisés. La poussée (résultante) estimée est égale à 151.4 kN ; le volume de sol mobilisé englobe également un volume de sol derrière le mur amont (voir section 3.1).
- Calcul 2 (Figure 8b) : Le mur amont et le sol derrière sont modélisés comme des charges verticales. La poussée (résultante) estimée est égale à 100 kN, soit une sous-estimation d'environ 33% ; le volume de sol mobilisé reste identique à celui d'un mur isolé sans interaction avec le mur amont.
- Calcul 3 (Figure 8c) : idem calcul 2, mais le mur amont est modélisé par un torseur complet à la base.

La poussée (résultante) estimée est égale à 140.7 kN, soit un écart d'environ 7%, qui doit être lié à la précision de calcul.

Ces calculs à la rupture avec Talren confirment la conclusion formulée à partir des résultats des calculs aux éléments finis : la poussée sur un mur aval ne peut pas être valablement estimée en considérant un mur amont comme une simple charge verticale appliquée à la surface d'un terrain horizontal. La poussée réelle doit être évaluée par des méthodes appropriées (calcul à la rupture, théorie de l'élasticité...).

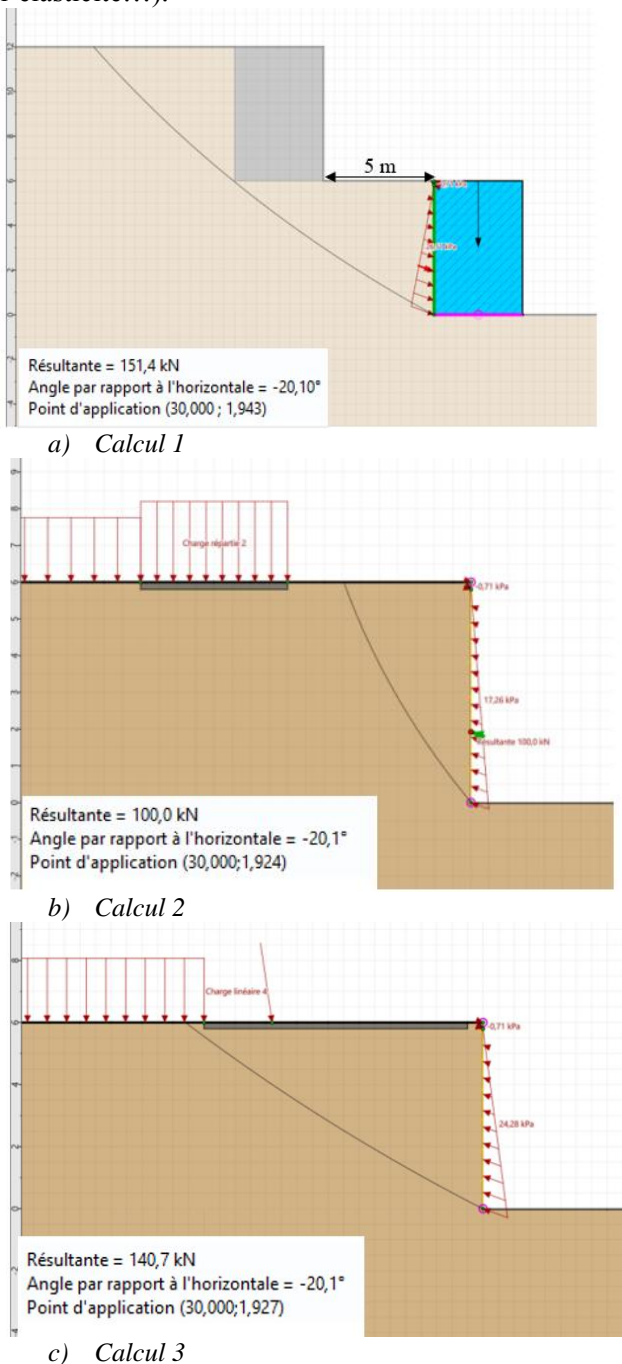


Figure 8. Estimation par la méthode de calcul cinématique à la rupture de la poussée sur le mur aval selon différentes hypothèses de calcul.

4.1.2 En termes de portance pour le mur aval

En l'absence d'instabilité générale, il n'y a pas d'impact direct du mur amont sur le coin de type Prandtl à la base du mur aval. Toutefois, la portance et la stabilité au glissement du mur aval doivent être justifiées en considérant la possible augmentation de la poussée.

4.2 Impact du mur aval sur le mur amont

4.2.1 En termes de poussée

Le principal impact du mur aval sur le mur amont se manifeste sous forme de déformations induites. En effet, le tassement, le basculement et le mouvement horizontal du mur aval accentuent ceux du mur amont. Pour vérifier l'éventuel impact de ces mouvements sur la poussée sur le mur amont, un calcul Plaxis a été réalisé pour un cas particulier (murs $H_1=H_2=6m$, $B_1=B_2=4m$; $D=5m$). Un sol unique ($\phi=30^\circ$, $c=0$ kPa) a été considéré mais avec des modules d'élasticité variables ($E = 30$ et 60 MPa) afin de vérifier une éventuelle incidence des niveaux de déformation. Les éventuels effets du phasage de construction et des travaux de terrassement ne sont pas considérés dans ce calcul, seul l'effet de déformations induites est examiné.

La Figure 9 présente les diagrammes de poussée sur le mur amont pour deux hypothèses de sol, avec présence du mur aval ou non (mur isolé), comparés avec celui évalué par la méthode « traditionnelle » à partir des coefficients de poussée de type (Kérisel et Absi, 1990). Sur cet exemple, il est montré que les mouvements du mur aval ne modifient pas notablement la valeur de la poussée s'exerçant le mur amont. Il faut noter que la finesse du maillage et certains effets numériques (des éléments d'interface) induisent de légères variations de résultats, mais que ces dernières ne sont pas suffisantes pour remettre en cause les conclusions

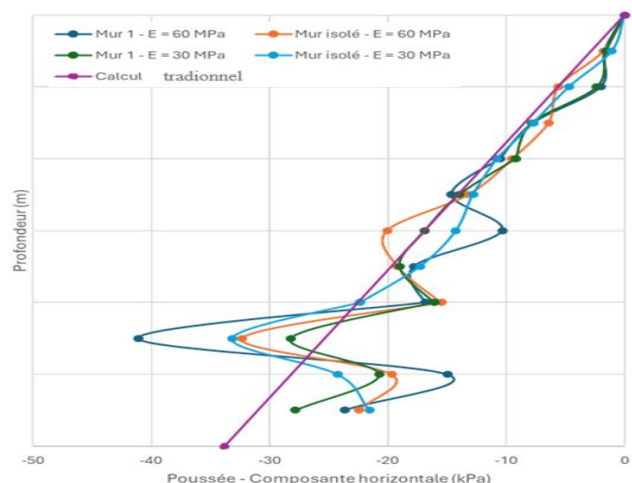


Figure 9. Diagramme de poussée sur le mur amont

4.2.2 En termes de portance

Les calculs de type Plaxis présentés dans le paragraphe 3.2 ont été réalisés pour des murs isolés. Pour vérifier l'impact du mur aval sur la portance et le volume du « coin de Prandtl » sous la fondation du mur amont, un calcul Plaxis a été réalisé avec deux murs à différentes distances (murs $H_1=H_2=6\text{m}$, $B_1=B_2=4\text{m}$; sol $\phi=30^\circ$, $c=0\text{ kPa}$; $D=2\text{m}-3\text{m}-4\text{m}-6\text{m}$). Il est montré que jusqu'à $D=3\text{m}$ (A_m du mur isolé), la portance et le volume du « coin de Prandtl » sont inchangés et correspondent à ceux du mur amont isolé. A $D=2\text{m}$, le volume du « coin de Prandtl » sous le mur amont est réduit (Figure 10), en raison de la proximité du mur aval rigide, et sa portance peut augmenter ou diminuer, de la façon suivante

- Augmentation si le mur aval est correctement dimensionné en considérant les poussées modifiées par la présence du mur amont (portance assurée). Dans ce cas, le mur aval contribue à l'amélioration de la portance du mur amont.

- Diminution si le mur aval est sous-dimensionné (portance non justifiée voir §4.1.2). Dans ce cas, le déficit de portance du mur aval peut réduire la portance du mur amont.

La présence du mur aval modifie peu la capacité portante du mur amont tant que le mur aval est correctement dimensionné avec les efforts (de poussée) provenant du mur amont.

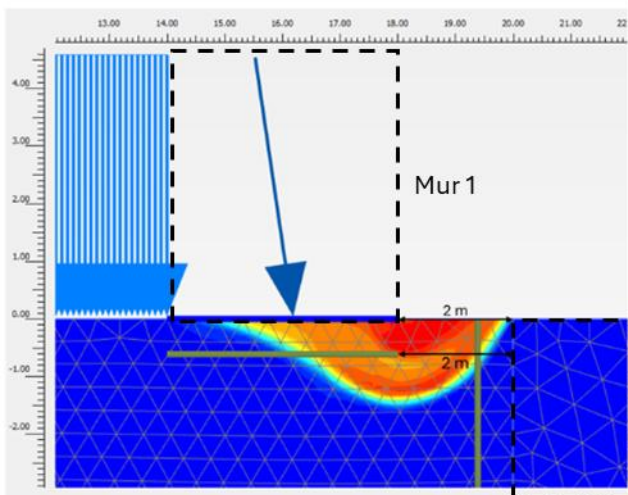


Figure 10. L'extension du volume de sol mobilisé sous la fondation du mur amont en présence du mur aval.

5 RECOMMANDATIONS

Les résultats de l'étude paramétrique réalisée ont permis de distinguer différents niveaux d'interaction des murs étagés. Pour les cas courants (stratigraphie tabulaire, absence de pente, hauteurs de soutènement

modérées...), il est possible de définir 4 configurations types d'interactions (Figure 11) :

- Interaction forte (schéma 1) : les murs sont très proches ($D < A_v$), les mécanismes de poussée des deux murs se recoupent ;

- Interaction modérée (schéma 2) : les murs sont proches ($A_v < D < A_m + A_v$), les mécanismes de poussée du mur aval et de portance du mur amont interfèrent ;

- Interaction faible (schéma 3) : les murs sont assez éloignés ($D > A_m + A_v$), les mécanismes de poussée du mur aval et de portance du mur amont ne se recoupent pas, ou seulement faiblement ;

- Interaction négligeable (schéma 4) : les murs sont suffisamment éloignés ($D \gg A_m + A_v$), l'interaction entre les deux murs devient négligeable.

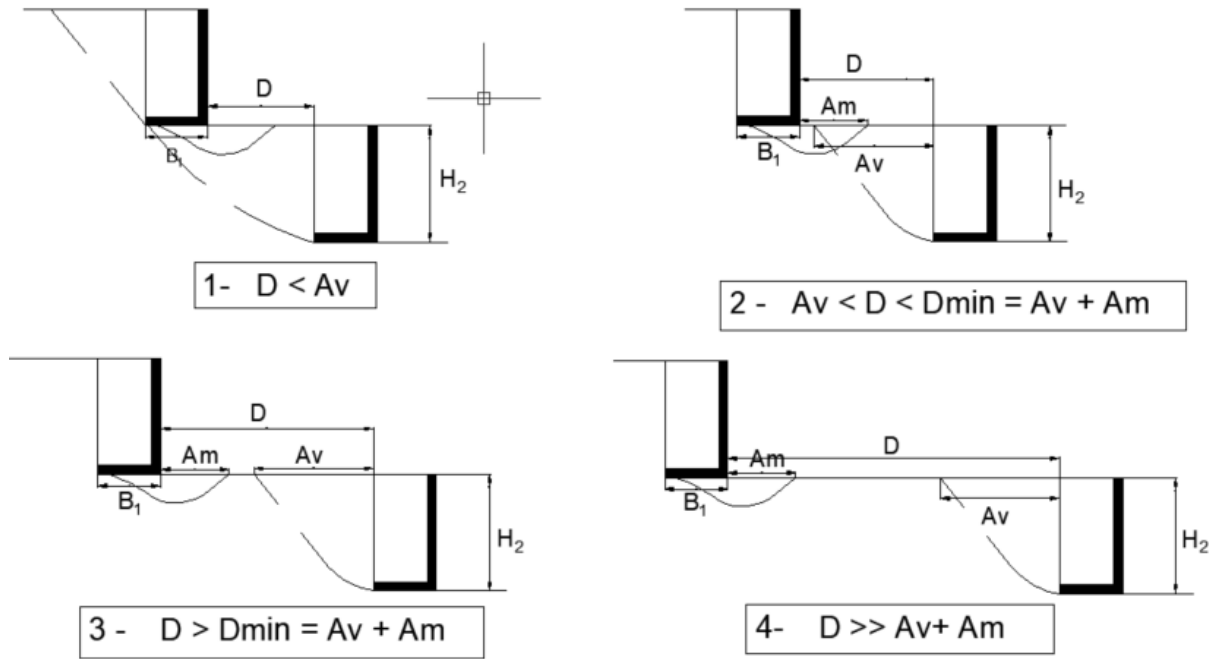
D'après les résultats de calcul présentés dans les paragraphes ci-avant, les distances A_v et A_m peuvent être estimées dans les gammes suivantes :

$$A_m = (0.5 \text{ à } 1.2) \times B_1 \quad \text{et} \quad A_v = (0.8 \text{ à } 1.7) \times H_2$$

Pour les niveaux d'interactions forte et modérée, les mécanismes de rupture interfèrent. Calculer les deux murs indépendamment comme deux murs isolés n'est pas une approche valable. La vérification de la stabilité du mur aval en termes de portance, glissement et excentrement doit tenir compte d'une poussée des terrains majorée par la présence du mur amont. Cette poussée majorée doit être estimée par des méthodes spécifiques relevant, soit de l'approche cinématique du calcul à la rupture ou de toute autre méthode d'équilibre limite assurant un équilibre général des forces, soit de méthodes numériques basées sur la méthode des éléments finis ou des différences finies.

Pour les niveaux d'interaction faible à négligeable, les mécanismes de rupture n'interfèrent pas. Calculer les murs indépendamment l'un de l'autre comme des murs isolés reste une approche valable pour les vérifications de stabilité et pour évaluer les valeurs des efforts internes

Il faut néanmoins noter que des déformations supplémentaires à celles de murs réellement isolés restent attendues même dans le cas d'interactions faibles. Dans le cas d'ouvrages présentant une sensibilité forte aux déformations (murs amont ou aval et/ou ouvrages avoisinants), la prise en compte de l'interaction entre les murs peut rester nécessaire et nécessite alors d'avoir recours à des méthodes numériques basées sur la méthode des éléments finis ou des différences finies.



Légendes : B_1 – largeur de la fondation du mur amont, H_2 – hauteur de soutènement du mur aval, D – distance entre l’aval de la fondation du mur amont et l’écran fictif du mur aval, A_m – extension latérale du mécanisme de portance du mur amont, A_v – extension latérale du mécanisme de poussée du mur aval, $D_{min} = A_m + A_v$

Figure 11 . Schémas d’interaction entre les deux murs étagés

6 CONCLUSIONS

Le travail du groupe a permis d’établir des propositions auprès de la commission de normalisation chargée de la rédaction de la future norme NF 94-281 « Murs de soutènement » pour la 2ème génération des Eurocodes. Les résultats de l’étude paramétrique réalisée montrent les différents mécanismes et niveaux d’interaction entre les murs, en termes de poussée et de portance, en fonction de la distance entre les murs. Elle permet notamment de définir les conditions dans lesquelles les interactions peuvent être négligées et dans quels cas elles sont très significatives. En perspective, l’étude pourra être élargie pour d’autres configurations plus complexes (eg. terrains en pente) ou pour prendre en compte l’incidence de travaux de terrassement et d’une façon plus générale du phasage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Kerisel, J. et Absi, E. (1990). *Tables de poussée et de butée des terres*. Presse de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- Nguyen, K-V., Leurent, L., Grosdidier, N., Fonty, M., Aguado, P., Caplane, C., Le Cor, T. (2025). Etude sur le comportement et les interactions des écrans de soutènement étagés. *Conférence 13^e JNGG*, Grenoble, France.
- Plumelle, C. (2013). *Théorie et pratique de la géotechnique*. Editions Le Moniteur, Paris, France.
- Prandtl, L. (1920). Über die Härte plastischer Körper. *Nachrichten der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch physikalischen Klasse*, pp 74–85.
- Reissner, H. (1924) Zum Erddruckproblem. *Proceedings of the 1st International Congress for Applied Mechanics*, Delft, The Netherlands.
- Salençon, J. (1983). *Calcul à la rupture et analyse limite*, Presses de l’ENPC, Paris, France.
- Van Baars, S. (2015). *100 years of Prandtl’s wedge*, IOS Press BV, Amsterdam, The Netherlands.