

Etude sur le comportement et les interactions des écrans de soutènement étagés

Behaviour and interactions of multi-level embedded walls

Khoa Van NGUYEN¹, Loïc LEURENT^{2*}, Nicolas GROSDIDIER³, Maxime FONTY³, Pascal AGUADO⁴,
Christopher CAPLANE⁵, Thomas LE COR⁶

1 Terrasol, Paris, France

2 Cerema, Haubourdin, France

3 Soletanche-Bachy, Rueil-Malmaison, France

4 Geotec, Plaisir, France

5 Fondasol, Avignon, France

6 NGE Fondations, Noyal-sur-Vilaine, France

RESUME : Dans le cadre de la révision de la norme NF P94-282 « Ecrans de soutènement » pour la 2^{ème} génération des Eurocodes, un groupe de travail s'est réuni pour analyser le sujet des écrans étagés en interaction dans le but d'établir des recommandations. Le présent article rend compte de ce travail et explicite d'abord les mécanismes et niveaux d'interaction entre écrans, ainsi que l'origine de certaines propositions formulées par le groupe de travail. Les analyses réalisées se basent sur une première approche analytique simple, complétée par une série d'études numériques aux éléments finis et paramétriques pour des configurations courantes d'ouvrage. Il est montré que les interactions entre écrans peuvent modifier significativement les poussées et butées, les coefficients de réaction, et par conséquent la stabilité, les déplacements et les efforts internes des deux écrans. Le point particulier de l'usage de tirants d'ancrage sur des écrans en interaction est également abordé. En conclusion, il est formulé des recommandations pour déterminer la distance entre écrans 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 P94-282 "Embedded Walls" for the second generation of Eurocodes, a working group met to analyse and make recommendations on the topic of multi-level embedded walls. This article reports on that work and first explains the mechanisms and levels of interaction between walls, as well as the origin of certain proposals formulated by the working group. The analyses carried out are based on an initial simple analytical approach, supplemented by a series of finite elements and parametric numerical studies for common structural configurations. It is shown that interactions between walls can significantly alter earth pressures and passive resistances, reaction coefficients, and consequently the stability, displacements, and internal forces of both walls. The specific issue of using ground anchors on interacting walls is also addressed. Conclusions are provided regarding the distances between walls beyond which interaction must be considered in design studies. Recommendations are given on calculation methods to be implemented for the different levels of interaction.

Mots-clés : Ecran de soutènement ; interaction ; poussée ; butée ; Eurocode

1 INTRODUCTION

Deux écrans sont dits en interaction lorsque les volumes de terrain nécessaires à leur équilibre respectif interfèrent ou lorsqu'ils sont reliés par des éléments structuraux. Ils sont dits étagés lorsque le volume de terrain mis en butée par l'écran amont interfère avec le volume de terrain exerçant une poussée sur l'écran aval.

La norme écran NF P 94-282 actuelle (2009, amendée en 2015 et 2020) met en garde sur des cas d'interaction entre ouvrages : Par exemple, l'absence

d'interaction entre l'écran et son ancrage (§8.1.(5) & section 14) doit être vérifiée. Dans le cas des versants instables (§1 (4)), il est rappelé que « Si l'écran contribue à la stabilisation d'un versant instable, sa justification doit tenir compte de son interaction avec le versant ». Par ailleurs, dans l'annexe F, consacrée aux calculs aux coefficients de réaction, est décrit le cas de « l'interpénétration des zones de butée élastique » correspondant à la situation où deux parois en vis-à-vis sont espacées de moins de trois fois la longueur de transfert élastique. Des indications sont données sur le choix du coefficient de réaction à retenir

dans ces cas particuliers. La valeur du coefficient de réaction est alors plus élevée que dans le cas usuel (Schmitt 2009) et le palier plastique (butée) est également plus important (Magnan 2018).

La norme NF P 94-282 rappelle également que cette méthode aux coefficients de réaction ne permet pas de « prendre en compte lorsqu'ils existent les déplacements d'ensemble provoqués par l'interaction entre des structures enterrées voisines (mur de quai et rideau d'ancrage situé à faible distance, ou écran retenu par des nappes d'ancrages multiples.) » Ces derniers exemples d'interaction s'illustrent respectivement par le cas du Port 2000 au Havre et celui du Canal d'aménagé de Gravelines (Schmitt, 2009). Enfin, la norme existante précitée indique, pour le calcul des déplacements (§8.3 (4)), que « le recours à un modèle numérique aux éléments finis ou aux différences finies est souhaitable voire nécessaire dans certaines conditions de projet (géométrie complexe, interaction entre ouvrages, déformations d'ensemble non négligeables, etc...) ».

Cependant, outre ces différents éléments de recommandations, la norme écran actuelle ne fournit pas d'indication précise et spécifique pour le cas des écrans étagés. Cette configuration s'est présentée ces dernières années sur des projets en contexte urbain contraint (Millotte, 2022 ; Guilloux, 2013) ou sur des infrastructures ferroviaires enterrées (ouvrages annexe ou gares enterrées du Grand Paris, Métro de Toulouse...). Dans le cadre des travaux de révision de la norme écran, menée sous l'égide de la commission de normalisation Justification des Ouvrages Géotechniques, un groupe de travail s'est constitué en 2024 en vue de faire des propositions ou préconisations sur ce sujet. Les travaux comprennent des approches analytiques et numériques dans le but de comprendre les mécanismes d'interaction et d'établir les cas à partir desquels l'interaction entre ouvrage pourrait être négligée.

2 METHODOLOGIE D'ETUDE

Une approche analytique est d'abord essayée sur deux aspects : le premier concerne la poussée de l'écran aval et il a été tenté à partir de la théorie de Coulomb de répondre à la question suivante : A partir de quelle distance d'un mur ou d'un écran, l'application d'une surcharge n'a plus d'influence sur le calcul de la poussée ? Le second aspect étudié analytiquement est celui de la butée de l'écran amont : Une approche analytique par la théorie de Coulomb a été explorée mais est restée limitée par le fait que l'hypothèse de rupture plane est davantage discutable que pour le mécanisme de poussée. Nous préférons par la suite (§3.2) simplement rappeler l'étendue des massifs de

butée, obtenue par résolution des équations de Boussinesq.

Ensuite, une série d'études paramétriques considérant deux écrans étagés a été réalisée par des calculs numériques aux éléments finis MISS-F. Dans l'objectif d'appréhender les principaux mécanismes et les niveaux d'interaction entre écrans, les configurations examinées (géométrie, dimensions, dispositifs constructifs, phasage de travaux...) sont simples mais suffisamment représentatives : deux écrans sont construits dans un massif de sol homogène, les hauteurs soutenues sont identiques et comprennent 1 lit de tirants d'ancrage ou de butons (Figure 1). Ces écrans et les appuis sont dimensionnés au préalable par des calculs MISS-K classiques, sans prise en compte de leur interaction mais avec une certaine marge pour éviter la rupture (divergence des calculs numériques). Les valeurs des principaux paramètres sont les suivantes :

- Sol : $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, $c = 0 \text{ kPa}$, $\phi = 30^\circ$, $E_Y = 60 \text{ MPa}$;
- Hauteurs de soutènement : $h_1 = h_2 = 6 \text{ m}$;
- Ecrans : matériau $EI = 94600 \text{ kN.m}^2/\text{ml}$ (équivalent aux palplanches AZ 20-800), longueurs $L_1 = 8 \text{ m}$ et $L_2 = 10 \text{ m}$;
- Tirants : écran 1 - $L_{\text{libre}} = 4\text{-}8 \text{ m}$, $L_{\text{scellée}} = 5 \text{ m}$, armature 5 T15.7, charge admissible à ELS $T_{Rd} = 250 \text{ kN}$, précontrainte 200 kN ; écran 2 - $L_{\text{libre}} = 4\text{-}8 \text{ m}$, $L_{\text{scellée}} = 12 \text{ m}$, armature 10 T15.7, charge admissible à ELS $T_{Rd} = 600 \text{ kN}$, précontrainte 450 kN ;
- Butons : écran 1 - tube $\Phi 400 \times 30 \text{ mm}$, raideur $k = 250000 \text{ kN/m/ml}$; écran 2 - tube $\Phi 500 \times 30 \text{ mm}$, raideur $k = 300000 \text{ kN/m/ml}$.

Le comportement et l'interaction des écrans sont étudiés en faisant évoluer les 3 paramètres suivants :

- Distance d entre les écrans : de 1 m à 15 m (distance limite où l'interaction devient faible à négligeable),
- Type d'appui : butons ou tirants,
- Longueur libre des tirants (cas des tirants).

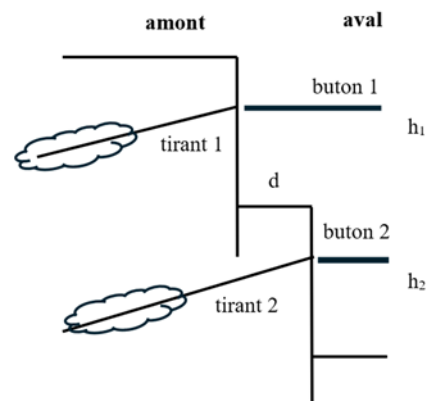


Figure 1. Configurations examinées des écrans étagés

Les calculs sont réalisés à l'aide du logiciel Plaxis 2D en considérant les hypothèses suivantes :

- Sol : loi élasto-plastique de type Hardening Soil Model (HSM)
- Eléments structurels : les écrans modélisés par des éléments de type « plate » avec des éléments d'interface ($R_{inter}=2/3$), les tirants par des éléments de type « node-to-node » et « embedded beam », les butons par des éléments de type « fixed-end anchors »
- Phasage : excavation et mise en place des appuis par phases, et calculs en « c-phi réduction »

3 MECANISMES D'INTERACTION

3.1 Poussée sur l'écran aval

3.1.1 Approche analytique

Nous considérons la configuration d'une surcharge linéaire « q » appliquée sur un terrain horizontal à l'amont d'un écran à une distance « $X=L.\tan(\alpha)$ », où « L » est la hauteur de l'écran et « α » est l'angle entre l'écran vertical et le point d'apparition de la surcharge (Figure 2). Le sol est ici purement frottant.

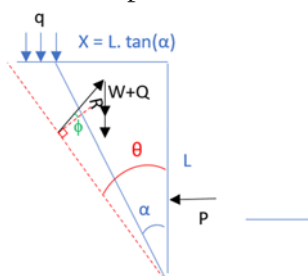


Figure 2. Poussée avec surcharge – Notations utilisées

Le principe, rappelé dans (Plumelle, 2013), consiste à calculer la force P pour les différentes valeurs de θ , en écrivant l'équilibre des forces en présence. Par la suite, le maximum de P(θ) est obtenu en cherchant la valeur de θ pour laquelle la dérivée de P(θ) par rapport à θ s'annule. Pour cet exercice, nous considérerons une inclinaison nulle de la poussée par rapport à la normale à l'écran. Lorsque θ est inférieure à α , cette méthode conduit au résultat connu :

$$\text{Max}[P(\theta, \theta < \alpha)] = \frac{\gamma.L^2}{2} \cdot \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \quad (1)$$

Où γ [kN/m³] est le poids volumique du sol, et ϕ son angle de frottement.

Examinons le cas où θ est supérieur à α , de manière analogue au cas précédent l'équilibre des forces permet d'abord d'écrire :

$$P(\theta, \theta > \alpha) = \frac{\gamma \cdot \frac{L^2}{2} \cdot \tan(\theta) + qL \cdot (\tan(\theta) - \tan(\alpha))}{\tan(\theta + \phi)} \quad (2)$$

La figure 3 illustre le calcul de P(θ). On observe deux maxima selon que l'angle θ est inférieur ou supérieur à l'angle α d'incidence de la surcharge. Dans l'exemple de la figure 3, la valeur de la force de poussée avec surcharge (située à un angle égal à $\pi/4$

- $\phi/2$) est nettement supérieure (400kN) à la force de poussée sans surcharge (333kN).

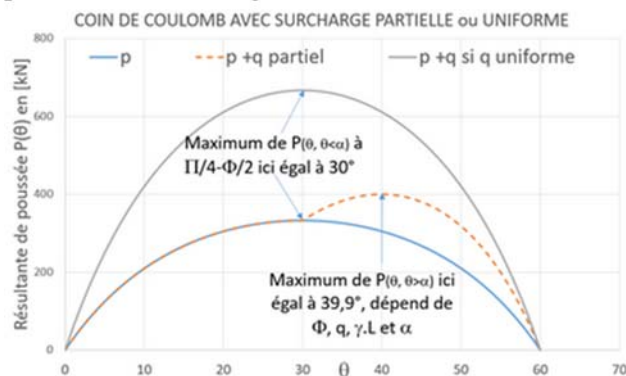


Figure 3. Exemple de calculs de poussée avec une surcharge partielle ou uniforme $q = 100$ kN/ml et $L = 10$ m ; $\gamma = 20$ kN/m³ ; $\phi = 30^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ (soit q appliquée à une distance de 5,77m)

Nous cherchons à exprimer le maximum de P($\theta, \theta > \alpha$) en étudiant la dérivée de cette fonction :

$$\frac{dP}{d\theta} = 0$$

$$\Leftrightarrow \sin(2(\theta + \phi)) = 2 \cdot \tan(\theta) \cos^2(\theta) - 2 \cdot \frac{\tan(\alpha)}{\left(\frac{\gamma.L}{2q} + 1\right)} \cos^2(\theta)$$

$$\Leftrightarrow \sin(2\theta) (\cos(2\phi) - 1) + \cos(2\theta) ((\sin(2\phi) + \beta) = -\beta$$

$$\text{avec } \beta = \frac{\tan(\alpha)}{\left(\frac{\gamma.L}{2q} + 1\right)} \quad (3)$$

Cette équation de la forme $A \cdot \cos X + B \cdot \sin X = C$ a une solution de la forme $\cos(X - Y) = C/R$ avec $r = \sqrt{A^2 + B^2}$ et $Y = \text{Arctan}\left(\frac{B}{A}\right)$. On trouve :

$$\theta_2 = \frac{1}{2} \left[\text{Arctan} \frac{\cos(2\phi) - 1}{\sin(2\phi) + \beta} + \text{Arccos} \left(\frac{-\beta}{\sqrt{(\cos(2\phi) - 1)^2 + (\sin(2\phi) + \beta)^2}} \right) \right] + [\pi]$$

ou :

$$\theta_2 = \frac{1}{2} \left[\text{Arctan} \frac{\cos(2\phi) - 1}{\sin(2\phi) + \beta} - \text{Arccos} \left(\frac{-\beta}{\sqrt{(\cos(2\phi) - 1)^2 + (\sin(2\phi) + \beta)^2}} \right) \right] + [\pi]$$

$$\text{avec } \beta = \frac{\tan(\alpha)}{\left(\frac{\gamma.L}{2q} + 1\right)} \quad (4)$$

Par la suite, nous cherchons à savoir, quelle est la valeur de α_{limite} , pour laquelle le maximum de P($\theta, \theta > \alpha$) devient égal ou plus petit au maximum de P($\theta, \theta < \alpha$) :

$$\frac{\gamma.L^2}{2} \cdot \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) = \frac{\gamma \cdot \frac{L^2}{2} \cdot \tan(\theta_2) + qL \cdot (\tan(\theta_2) - \tan(\alpha))}{\tan(\theta_2 + \phi)} \quad (5)$$

où θ_2 est la solution supérieure à α obtenue en (4)

Nous donnons en figure 4, les valeurs, obtenues par itération, de $\tan(\alpha_{limite})$, en fonction du rapport $2.q/(\gamma L)$ et pour différents angles de frottement. Cette figure peut se lire ainsi : Dans un terrain avec $\phi = 25^\circ$, si une surcharge s'applique en amont d'un écran de hauteur L, à une distance de 1,3 fois L, alors celle-ci n'a pas d'influence sur le calcul de la poussée sur l'écran lorsque le rapport $2.q/(\gamma L)$ est inférieur à 5. Pour ce même rapport, dans un terrain avec $\phi = 35^\circ$, la surcharge doit être éloignée de 0,9.L pour ne pas influencer le calcul de la poussée.

Sur la figure 4, à l'origine, lorsque q tend vers zéro, les courbes tendent vers une ordonnée égale à $\tan(\pi/4 - \phi/2)$. Ces résultats illustrent bien qu'il ne suffit pas que la surcharge soit située au-delà du 'coin de coulomb' tracé suivant un angle de $\pi/4 - \phi/2$ pour que celle-ci n'ait pas d'influence. La distance à l'écran à partir de laquelle la surcharge n'accroît pas les poussées dépendra du rapport $2.q/(\gamma L)$. Ce rapport rend compte de l'importance relative de la surcharge vis-à-vis du poids des terres dans le calcul de la poussée : 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 poussée.

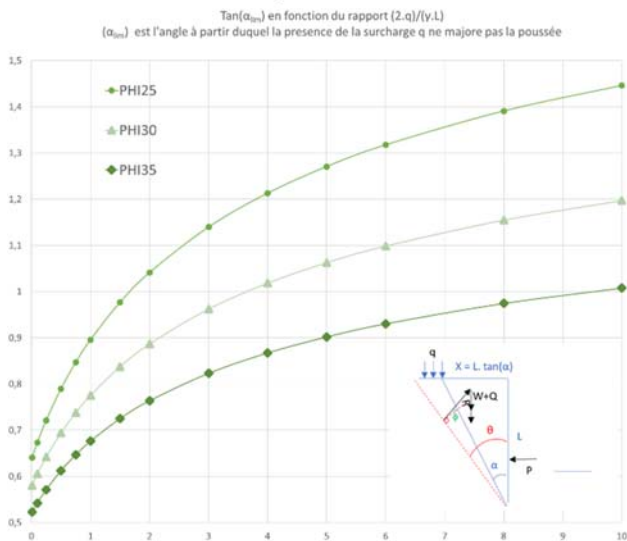


Figure 4. Résultat de l'approche analytique (Coulomb)

3.1.2 Approche numérique

La Figure 5 illustre les volumes de poussée derrière les écrans butonnés espacés de $d = 3$ m et 6 m et permet de visualiser que le volume derrière l'écran aval englobe également un volume derrière l'écran amont, ce qui implique pour l'écran aval une poussée plus importante que celle obtenue en l'absence (d'interaction) de l'écran amont. Ce constat est aussi observé pour le cas des écrans tirantés (Figure 6), avec des géométries différentes pour les volumes de poussée du fait de l'interaction avec la partie scellée des tirants. Dans tous les cas, la géométrie du volume de poussée est fonction de la distance entre écrans.

Des calculs complémentaires ont également été réalisés par la méthode cinématique à la rupture à l'aide du logiciel Talren pour ces 2 écrans espacés de $d = 1$ m, 3 m, 6 m et 9 m. Les résultats obtenus par ces calculs confirment la même tendance : Pour des écrans suffisamment proches, le volume de poussée aval englobe le volume de poussée amont et varie en fonction de la distance entre écrans. A partir d'une certaine distance (ici $d = 9$ m), l'interaction entre les écrans devient faible et la géométrie du volume

poussée de type Coulomb d'un écran isolé est retrouvée.

Ainsi, les calculs analytiques et numériques mettent en évidence la variation de l'amplitude de la poussée sur l'écran aval, et le volume de sol associé, en fonction de la hauteur, de la fiche, du type d'appui (butons ou tirants) de l'écran amont et, surtout, de la distance entre écrans.

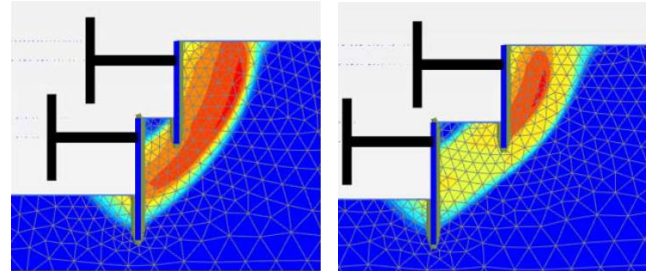


Figure 5. Ecrans butonnés - Volumes de poussée derrière les écrans pour $d = 3$ m et 6 m

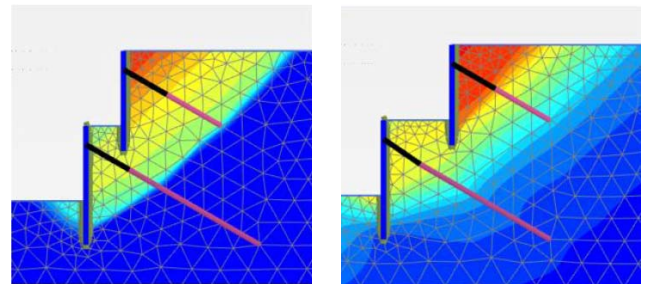


Figure 6. Ecrans tirantés - Volumes de poussée derrière les écrans pour $d = 3$ m et 6 m

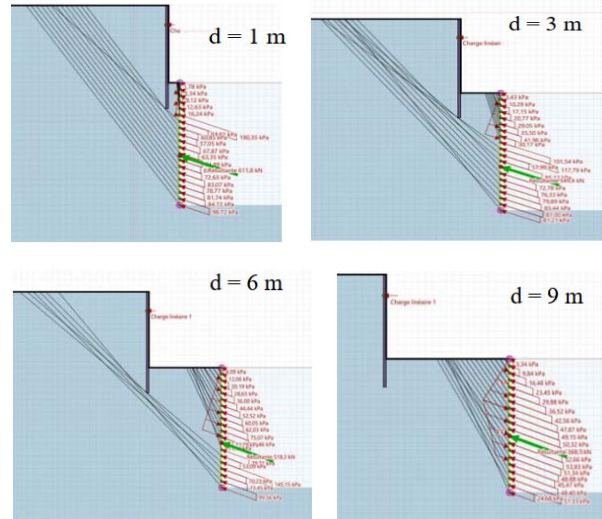


Figure 7. Calculs Talren - Volumes de poussée derrière les écrans pour $d = 1$ m, 3 m, 6 m et 9 m

3.2 Butée devant la fiche de l'écran amont

Il est entendu que la présence d'une excavation à l'aval d'un écran modifiera la valeur de la butée. Il est toutefois intéressant de rappeler l'étendue de la distance depuis l'écran du volume de sol mis en butée dans le cas d'une hypothèse de terrain horizontal à l'aval d'un écran. Pour ce faire, la figure 8 a été

produite à partir d'un travail de résolution numérique de l'équation de Boussinesq, ayant conduit à l'établissement des tables de Caquot – Kérisel – Absi, (Burlon, 2023). On notera que l'étendue maximale dans les cas courants ($\phi < 40^\circ$, $\delta/\phi = -2/3$) est de l'ordre de 3 fois la hauteur de la fiche.

Courbe	ϕ (°)	l [m]	β (°)	λ (°)	δ/ϕ	butée (Intégration numérique)	butée (Rankine)
1	20	1	0	0	-0,67	2,73	2,04
2	25	1	0	0	-0,67	3,72	2,46
3	30	1	0	0	-0,67	5,26	3,00
4	35	1	0	0	-0,67	7,77	3,69
5	40	1	0	0	-0,67	12,21	4,60
6	45	1	0	0	-0,67	20,85	5,83

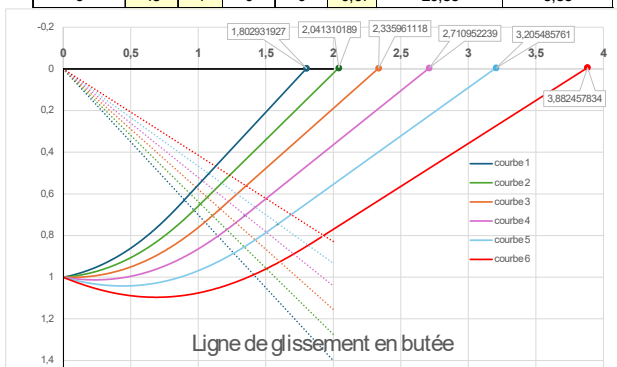


Figure 8. Etendue butée (hypothèse terrain horizontal)

La présence de l'écran aval influence la valeur de la butée devant la fiche de l'écran amont et diminue le volume « disponible » de la butée amont. A l'inverse, les éléments structurels de l'écran aval (pieux, parois, buton...) peuvent contribuer à la butée mobilisable amont.

Un autre aspect pouvant influencer la valeur de la butée de l'écran amont concerne l'hypothèse de son inclinaison : Le tassement généré par l'excavation devant l'écran aval peut réduire, ou atténuer, le mouvement vers le haut du sol devant la fiche de l'écran amont.

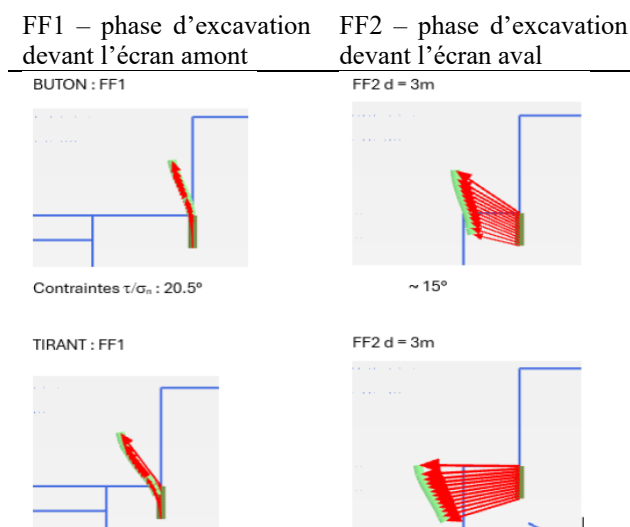


Figure 9. Inclinaison de la butée devant l'écran amont

L'inclinaison de la butée amont pourrait être réduite, comme montré sur la Figure 9.

Les différents mécanismes d'interaction listés ci-dessus doivent être pris en compte dans le calcul de la butée mobilisée et mobilisable amont. Il est envisageable de les considérer par différents moyens : soit par des calculs simplifiés mais sécuritaires, soit par des calculs à la rupture, soit par des calculs numériques de type éléments finis.

4 INTERACTIONS ENTRE ECRANS

4.1 Cas des écrans butonnés

4.1.1 Impact de l'écran amont sur l'écran aval

L'impact de l'écran amont sur l'écran aval se manifeste sous la forme d'un report de charge, qui augmente la poussée sur l'écran aval, comme montré dans le paragraphe §3.1. Par conséquent, plus les écrans sont proches, plus le déplacement et les efforts de l'écran aval sont importants (Figure 10). Lorsque la distance d est suffisante (ici $d = 9-15$ m), l'interaction devient faible, le déplacement et les efforts dans l'écran aval se stabilisent.

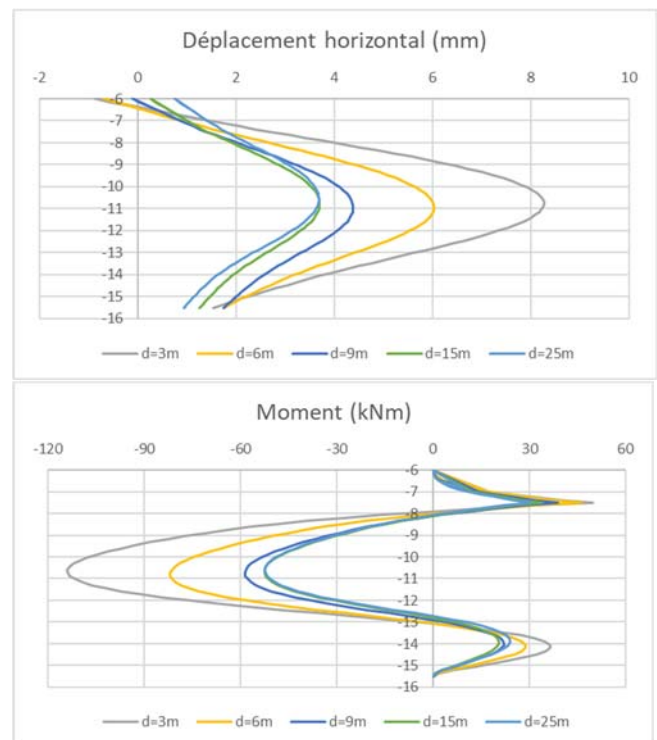


Figure 10. Ecrans butonnés - Déformation et moment de l'écran aval pour différentes distances « d » entre écrans

4.1.2 Impact de l'écran aval sur l'écran amont

L'impact de l'écran aval sur l'écran amont se manifeste sous la forme d'un déplacement imposé. La partie haute de l'écran amont est quasi bloquée par le buton. La partie basse y compris la fiche se déplace,

accompagnant le déplacement de l'écran aval (Figure 11). Lorsque les écrans se rapprochent, l'amplitude du déplacement de la fiche de l'écran amont augmente (7 mm max pour $d = 3$ m, 3 mm max pour $d = 25$ m) traduisant une réduction de la butée ou de la raideur de sol devant la fiche amont.

Les écrans de soutènement sont des structures sensibles aux déformations. Un déplacement imposé peut augmenter significativement les efforts dans l'écran. C'est bien ce qui est observé pour l'écran amont : Plus les écrans sont proches, plus l'effet du déplacement de l'écran aval est important, plus le déplacement et les efforts de l'écran amont sont importants (Figure 11). A partir d'une certaine distance (ici $d = 15$ m), l'interaction devient faible, le déplacement et les efforts dans l'écran amont se stabilisent.

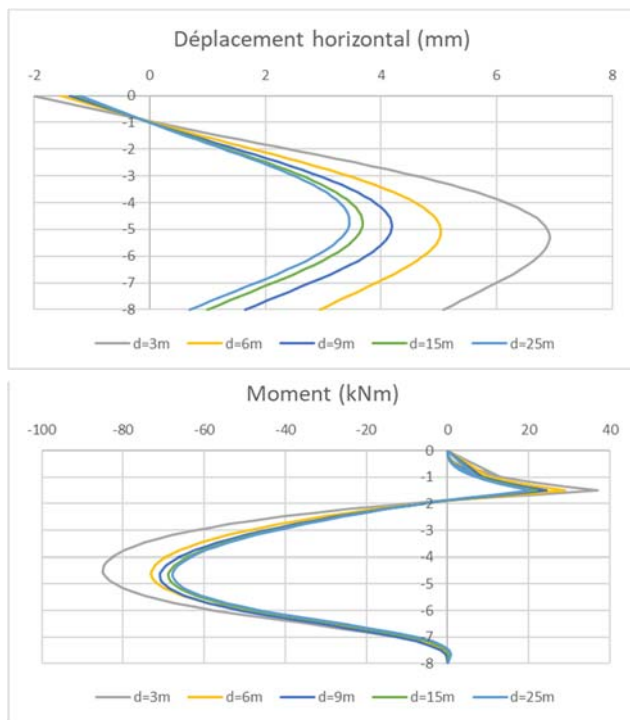


Figure 11. Ecrans butonnés - Déformation et moment de l'écran amont pour différentes distances « d » entre écrans

4.2 Cas des écrans tirantés

La même tendance est observée pour les écrans tirantés : plus les écrans sont proches, plus les déplacements et les efforts de deux écrans sont importants (Figure 12).

La différence notable par rapport au cas d'écrans butonnés concerne le déplacement de l'écran amont sous l'impact du déplacement induit par l'écran aval. On observe un déplacement de type translation de l'écran amont lorsque les écrans se rapprochent, avec une amplitude importante : 28 mm max pour $d = 3$ m, 8 mm max pour $d = 25$ m, soit 20 mm de différence

pour ces 2 distances d (au lieu de 4 mm de différence dans le cas des écrans butonnés). Ce résultat peut s'expliquer par un mouvement d'ensemble des 2 écrans et des volumes de sol associés, qui enveloppent la partie scellée du tirant amont (Figure 6). Ainsi, le point « fixe » du tirant amont (point central de la partie scellée) n'est plus fixe. Le déplacement de ce point explique le déplacement plus important de l'écran amont.

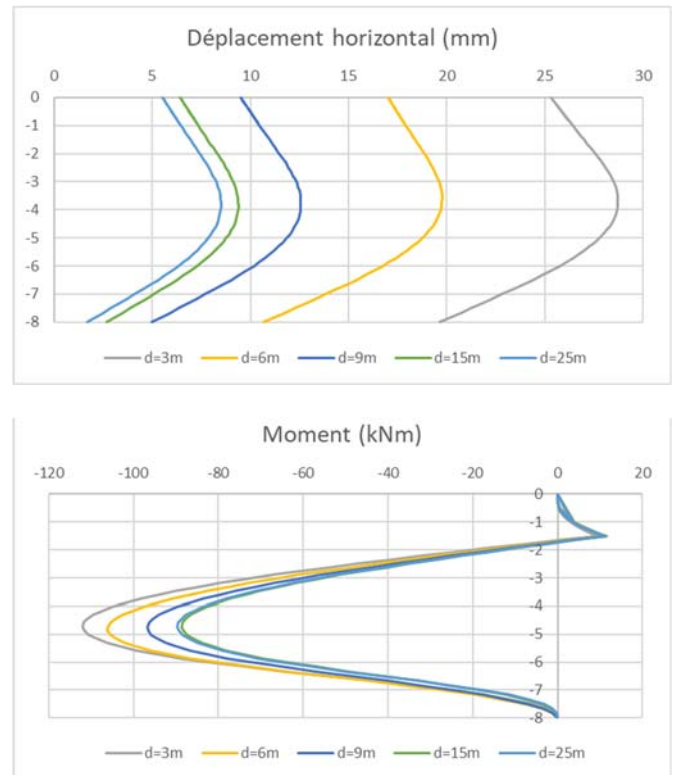


Figure 12. Ecrans tirantés - Déformation et moment de l'écran amont pour différentes distances d

Le déplacement de la partie scellée (ou point fixe) du tirant amont met en évidence un mécanisme assimilable à une extension du massif d'ancrage des tirants (type Kranz) ; les schémas de vérification du massif d'ancrage de l'écran isolé ne sont plus valables pour les écrans étagés. Il est nécessaire donc d'augmenter la longueur libre des tirants pour tenir compte de cette extension du massif d'ancrage « Kranz ». Considérons 2 écrans tirantés proches ($d = 3$ m) avec 2 longueurs libres des tirants (4 m et 8 m) : la Figure 13 illustre le volume de la poussée derrière les écrans, et la Figure 14 présente le déplacement et le moment de l'écran amont pour ces 2 configurations. Il est observé qu'avec une longueur libre suffisante (ici 8 m), la partie scellée du tirant amont est située hors de la zone en mouvement, le point fixe du tirant reste fixe, le déplacement de l'écran est réduit.

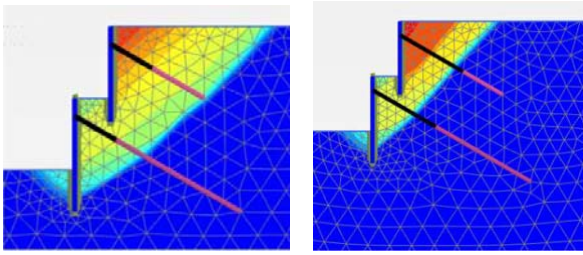


Figure 13. Ecrans tirantés ($d=3m$) - Volumes de poussée derrière les écrans pour $L_{libre} = 4 m$ et $8 m$

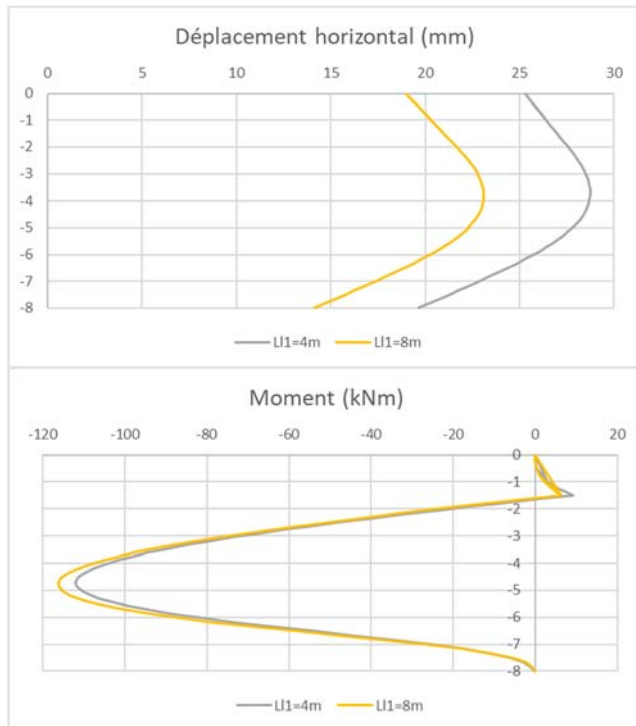


Figure 14. Ecrans tirantés ($d=3 m$) - Déformation et moment de l'écran amont pour $L_{libre} = 4 m$ et $8 m$

4.3 Cas des écrans autostables

Des modélisations numériques équivalentes ont également été effectuées pour deux écrans autostables étagés de dimensions identiques. Les effets de l'interaction se traduisent également sur les deux écrans par une réduction de leur stabilité, et par une augmentation de leurs efforts internes et de leurs déplacements. D'une manière générale, l'écran amont est plus sensible aux effets de l'interaction (augmentation importante des déformations), du fait à la fois de la réduction du volume de sol « disponible » pour la butée, et des mouvements de l'écran aval.

5 RECOMMANDATIONS

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

modérées, critère de déplacements peu sévères...), il est possible de définir 4 configurations d'interactions (Figure 15) :

- Interaction forte (schéma 1) : les écrans sont très proches ($D < A_m$ ou A_v), les volumes de poussée des deux écrans se recoupent.
- Interaction modérée à forte (schéma 2) : les écrans sont proches ($D < A_m + A_v$), le volume de butée de l'écran amont et la volume de poussée de l'écran aval se recoupent. La partie de terrain située entre les deux écrans est en interaction avec ces deux structures.
- Interaction faible (schéma 3) : les écrans sont relativement éloignés l'un de l'autre ($D > A_m + A_v$), les volumes de poussée et de butée de 2 écrans ne se recoupent pas, ou seulement faiblement.
- Interaction négligeable (schéma 4) : les écrans sont suffisamment éloignés l'un de l'autre ($D \gg A_m + A_v$), l'interaction entre les deux écrans 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 :

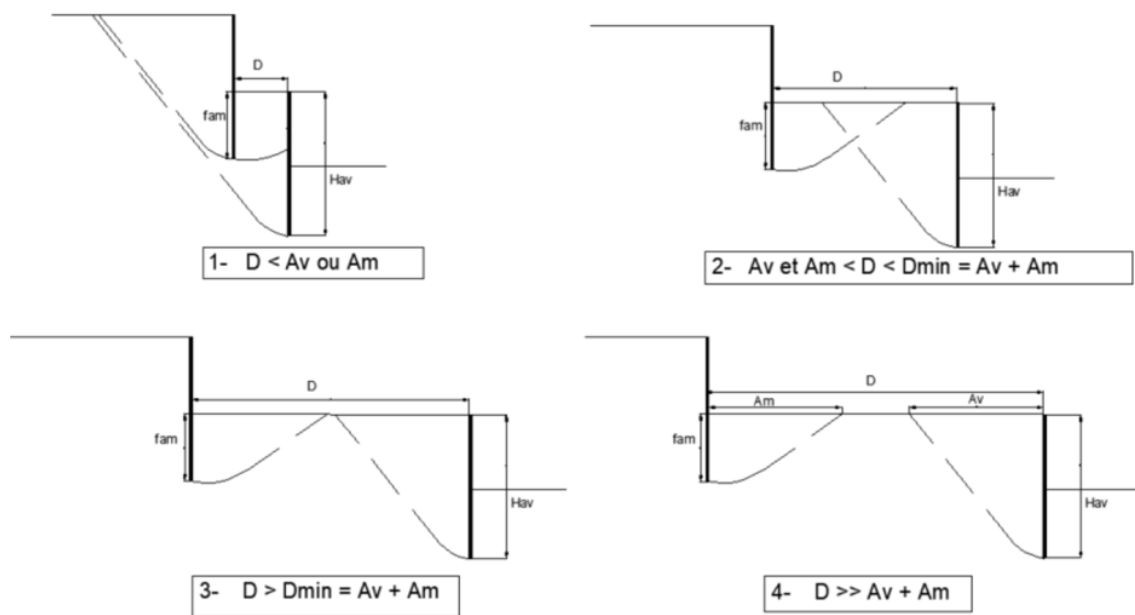
$$A_m = (2.5 \text{ à } 3.5) \times f_{am} \quad \text{et} \quad A_v = (0.8 \text{ à } 1.3) \times H_{av}$$

Pour des configurations complexes d'interaction, l'estimation rigoureuse des extensions latérales des mécanismes de butée et poussée, ne peut être réalisée que par un calcul numérique aux éléments finis.

Pour les niveaux d'interaction faible à négligeable, les mécanismes de rupture n'interfèrent pas. Le dimensionnement des écrans indépendamment l'un de l'autre en considérant des écrans isolés reste une approche valable.

Pour les niveaux d'interaction modérée et forte, les mécanismes de rupture interfèrent. La théorie de Caquot ou Kerisel et Absi n'est plus une méthode valable pour déterminer les coefficients de poussée et butée. Les approches valant pour des écrans isolés ne s'appliquent pas. La vérification de la stabilité globale et l'estimation des déplacements et des efforts internes des deux écrans doivent être effectuées en tenant compte de ces interactions. Dans le cas des écrans tirantés, il est nécessaire de réaliser une vérification spécifique de la stabilité du massif d'ancrage (de type Kranz) en prenant en compte l'ensemble de la hauteur de l'aménagement y compris pour l'écran supérieur. Il est souhaitable d'avoir recours à une modélisation numérique de type milieu continu (méthode des éléments finis ou des différences finies) pour ces configurations.

Dans le cas d'une présence d'ouvrages ou d'avoisnants sensibles au déplacement, une modélisation numérique peut être nécessaire pour mieux appréhender les déformations du terrain et des écrans et leurs incidences sur ces ouvrages existants.



Légende

- f_{am} fiche mécanique de l'écran amont mobilisant la butée
- H_{av} – hauteur totale de l'écran aval jusqu'à la base de la fiche mécanique
- D – distance entre les deux écrans
- A_m - extension latérale du mécanisme de butée de l'écran amont
- A_v - extension latérale du mécanisme de poussée de l'écran aval

Figure 15 . Schémas illustrant les différents niveaux d'interaction entre deux écrans étagés

6 CONCLUSIONS

Le travail mené a permis d'éclairer la rédaction d'une nouvelle annexe sur le sujet des écrans étagés de la future norme NF 94-282 « Ecrans de soutènement » révisée dans le cadre du déploiement de la 2ème génération des Eurocodes. Les résultats de l'étude paramétrique réalisée montrent les différents mécanismes et niveaux d'interaction entre les écrans, en poussée et en butée, en fonction de la distance entre les écrans. Il est également donné des indications sur la géométrie d'écrans étagée pour laquelle les interactions peuvent être négligées et les deux écrans calculés indépendamment l'un de l'autre comme des écrans isolés. Le projet d'annexe à la norme écran et les propositions qui y sont formulées restent à discuter, courant 2026, par la Commission de Normalisation Justification des Ouvrages Géotechniques. Ainsi ce travail pourra être complété pour répondre aux besoins du processus de normalisation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Burlon, S. (2023) Un exemple d'intégration numérique des coefficients de poussée et de butée en milieux pesants. *Revue Française de Géotechnique* n°174, 3. France.
- Guilloux, A. Porquet M, De Lavernée P., Lyonnet P, Roman P. (2013) Conception, Modélisation et auscultation d'une très grande excavation à Monaco. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 1991-1994, Paris, France.
- 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.
- Magnan J.-P. et Meyer G. (2018) Influence des interactions entre écrans de soutènement sur le calcul de butée *Revue Française de Géotechnique* n°154, 2. France.
- Millette J. et Fonty M. (2022). Tour Hekla : Modélisation de l'interaction d'une paroi berlinoise et d'une paroi moulée tirantée. *11èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Lyon 2022, France.
- Plumelle, C. (2013). *Théorie et pratique de la géotechnique*. Editions Le Moniteur, Paris, France.
- Salençon, J. (1983). *Calcul à la rupture et analyse limite*, Presses de l'ENPC, Paris, France.
- Schmitt P. (2009). De l'importance du suivi pour maîtriser le dimensionnement des ouvrages géotechniques, *Revue Française de Géotechnique* n°126-127, France.