

# Justification des murs de soutènement en T : rôle du plan fictif pour le calcul de la poussée

## T-shaped retaining walls justification: the role of the virtual back for the active earth pressure calculus

Amélie MENIL <sup>1\*</sup>, Sébastien BURLON <sup>1</sup>

*1 CEREMA – Département des Techniques d’Ouvrages d’Art (DTOA), Champs-sur-Marne, France*

*\*amelie.menil@cerema.fr*

**RESUME :** Le dimensionnement et la justification des murs de soutènement ont été formalisés en France depuis les années 1960 par la mise en application de méthodes décrites dans MUR 73 (SETRA, 1973) puis dans les recommandations du SETRA. Aujourd’hui, ces méthodes sont intégrées à la norme NF P94-281 (NF P94-281, 2014) qui vient décliner l’Eurocode 7 pour le dimensionnement des murs de soutènement.

La poussée exercée par le remblai sur un mur de soutènement est généralement calculée à l’aide des méthodes de Coulomb, Rankine ou Caquot et Kerisel selon la norme NF P 94-281. Cette poussée traduit un mécanisme de rupture plausible, s’appliquant en général sur un plan fictif incliné, ou un mécanisme de rupture conventionnel, en s’appliquant sur un plan fictif vertical à l’arrière de la semelle.

Cette dernière approche a pour objectif de simplifier les calculs à mettre en œuvre pour le dimensionnement du mur. Néanmoins, le plan fictif vertical ne correspond à aucun mécanisme de rupture réel et ne peut donc pas être physiquement justifié. La comparaison entre les résultats obtenus entre les plans fictifs vertical et incliné est présenté dans cet article. Cet exercice bien que théorique revêt un intérêt pratique pour les ingénieurs qui doivent faire le choix de l’utilisation de ce plan fictif. Les éléments de comparaison présentés peuvent permettre d’optimiser les murs de soutènement.

**ABSTRACT:** The design and the verification of gravity walls has been elaborated in France since the 1960s through the implementation of methods described in MUR 73 (SETRA, 1973) and subsequently in the SETRA recommendations. Today, these methods are incorporated into the standard NF P94-281 (NF P94-281, 2014), which implements Eurocode 7 for the design of retaining walls.

The active earth pressure exerted by the backfill on a retaining wall is generally calculated using the Coulomb, Rankine or Caquot and Kerisel methods in accordance with standard NF P94-281. This active earth pressure can reflect a plausible failure mechanism, generally applying an inclined fictive plane, or a conventional failure mechanism, applying a vertical fictive plane at the back of the footing.

The latter approach aims to simplify the calculations required for wall design. However, the vertical fictive plane does not correspond to any real failure mechanism and therefore cannot be physically justified. This article presents a comparison between the results obtained for the vertical and inclined fictive planes. Although theoretical, this exercise is of practical interest to engineers who have to decide whether to use this fictive plane. The comparison elements presented can be used to optimise retaining walls.

**Mots-clés :** écrans de soutènement ; murs en T ; poussée ; dimensionnement.

### 1 PRINCIPE DU CALCUL DES ACTIONS EXERCÉES SUR LES MURS DE SOUTÈNEMENT

Les méthodes de calcul des actions exercées par un massif de sol retenu par un écran sur celui-ci sont toutes fondées sur le même postulat de base : une condition de rupture plastique est envisagée au sein du massif de sol ou le long de surfaces spécifiques. La théorie de Coulomb s’intéresse à un massif de sol homogène, isotrope et pulvérulent limité par un talus semi-infini plan. Un prisme de glissement dans le

terrain se met en mouvement. Les hypothèses de Coulomb sont que la surface de glissement dans le sol est un plan, le matériau contenu à l’intérieur du prisme de glissement se comporte comme un corps solide indéformable, le prisme de glissement est en équilibre limite sur les faces en contact avec le massif et l’écran. Les méthodes développées par Culmann et Poncelet sont des méthodes dérivées de cette théorie qui s’apparente dans le formalisme du calcul à la rupture à une approche par l’extérieur (SETRA, 1973). Le plan de rupture peut aussi être remplacé par une spirale logarithmique. La méthode de Caquot et Kerisel relève

quant à elle d'une approche statique par l'intérieur (Caquot & Kerisel, 1948) : la forme du mécanisme n'est pas supposée ; elle est obtenue par l'analyse du champ de contraintes calculé qui respecte les équations de l'équilibre et le critère de rupture plastique de Mohr-Coulomb.

L'intensité et la distribution des actions de poussée ou de butée dépendent du type de mur considéré, des propriétés du sol et de l'amplitude des déplacements susceptibles d'affecter le mur sur lequel s'appliquent ces pressions. Leur calcul dépend de paramètres tels que la charge sur la surface du terrain et la pente de cette surface, les nappes d'eau et forces d'écoulement dans le terrain, l'amplitude et la direction du mouvement relatif par rapport au terrain, la résistance au cisaillement et le poids volumique du terrain, la rugosité du mur.

Les valeurs limites de la poussée ou de la butée dues aux terrains et le cas échéant à une charge uniforme sur le terrain, sont déterminées à partir des coefficients de Caquot, Kerisel et Absi, tirés des tables qu'ils proposent (Kerisel & Absi, 1990) ou obtenus à partir d'une procédure numérique (Burlon, 2023).

L'approche cinématique de la théorie du calcul à la rupture peut aussi être mise en œuvre pour la détermination des contraintes de poussée et de butée des terres. Il convient de déterminer les valeurs limites de la poussée qui agit à l'arrière d'un mur et de la butée qui est mobilisée à l'aval de celui-ci à partir des valeurs des contraintes effectives dans le terrain, des propriétés du terrain en conditions drainées ( $c'$  et  $\varphi'$ ) et tenant compte de l'inclinaison de la poussée. Les efforts de butée interviennent en général peu dans la stabilité d'un mur de soutènement. Il est primordial de s'assurer de leur pérennité pour pouvoir les considérer. Ainsi, dans le cadre de cette étude, ils ne seront pas considérés.

## 2 CALCUL DE LA POUSSEE AVEC UN ECRAN FICTIF INCLINE

Quand l'écran fictif est incliné, ce dernier peut être affleurant (Figure 1) ou totalement situé sous la surface du remblai (Figure 2).

Le calcul des forces appliquées au système se décompose comme le calcul des forces appliquées par le poids du mur, comprenant le poids du voile et le poids de la semelle, le poids propre du coin de sol mobilisé et l'action de la poussée. Pour le calcul du poids propre du coin de sol mobilisé, il est nécessaire de veiller à considérer une aire tronquée à la surface dans le cas représenté à la Figure 1.

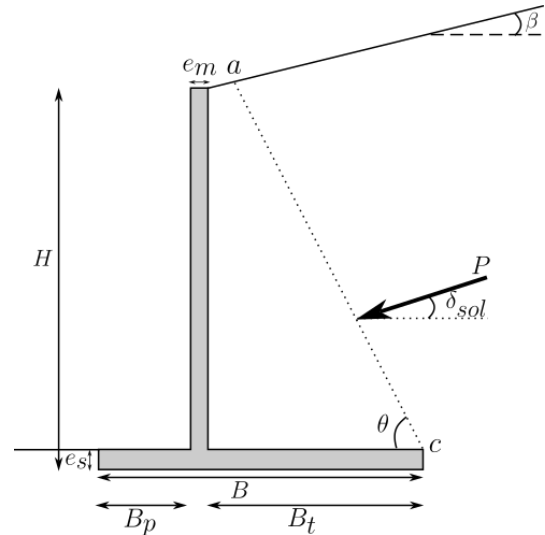


Figure 1. Schéma du mécanisme de rupture par un écran incliné remontant en surface (d'après (NF P94-281, 2014)).

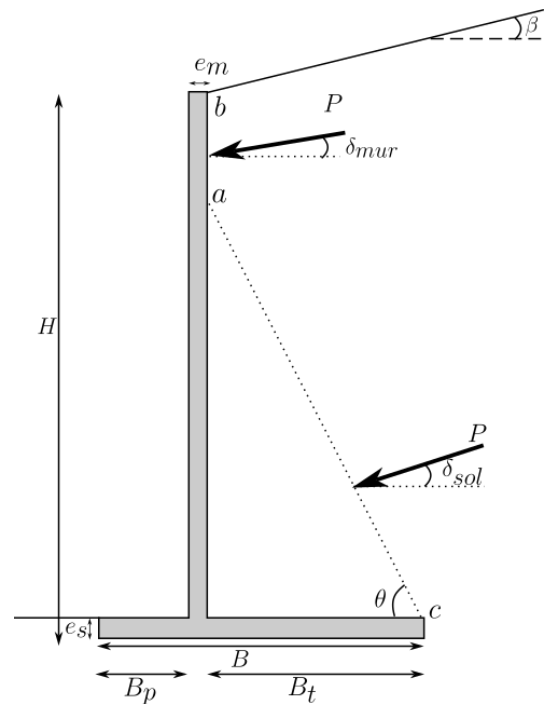


Figure 2. Schéma du mécanisme de rupture par un écran incliné entièrement compris sous la surface du remblai (d'après (NF P94-281, 2014)).

Pour l'étude d'un écran fictif incliné affleurant (Figure 1), un coefficient de poussée pour les milieux pesants est calculé à l'aide des formules utilisées pour les tables de (Kerisel & Absi, 1990).

Pour l'étude du mécanisme décrit à la Figure 2, il est nécessaire de calculer un coefficient de poussée pour les milieux pesants à appliquer le long de la surface de discontinuité, un coefficient de poussée pour les milieux pesants à appliquer le long du mur et un coefficient de poussée pour les milieux non pesants surchargés uniformément. Le détail des équations

utilisées pour la détermination de ces coefficients pourra être trouvé dans (Burlon, 2023).

La formule de la poussée peut s'écrire comme suit :

$$P_a = K_a \gamma l \quad (1)$$

Où  $P_a$  (kPa) est la poussée active,  $K_a$  est le coefficient de poussée,  $\gamma$  ( $\text{kN.m}^{-3}$ ) est le poids volumique du terrain et  $l$  (m) est la longueur sur laquelle s'applique la poussée.  $K_a$  dépend de l'inclinaison de l'écran fictif  $\theta$  (équation (2)) et de l'inclinaison de la poussée  $\delta$  (elle-même dépendante de la géométrie du mur et des propriétés mécaniques du remblai, Tableau 1. Inclinaison des actions de poussée sur l'écran fictif incliné (NF P94-281, 2014). Tableau 1). L'orientation de l'action de la poussée, définie par l'angle  $\delta$ , est comprise entre 0 et  $\varphi$ , angle de frottement du remblai.

Tableau 1. Inclinaison des actions de poussée sur l'écran fictif incliné (NF P94-281, 2014).

Inclinaison	Figure 1	Figure 2
$\delta_{sol}$	$\varphi$	$\varphi$
$\delta_{mur}$	-	$2/3.\varphi$

La combinaison de l'ensemble de ces actions permet d'obtenir les efforts verticaux et horizontaux ainsi que les moments appliqués au système. Il est alors possible de calculer l'excentrement et l'inclinaison du chargement.

### 3 CALCUL DE LA POUSSEE AVEC UN ECRAN FICTIF VERTICAL

Le calcul mené avec un écran vertical est purement conventionnel : le choix de l'inclinaison des contraintes de poussée permet qu'il soit équivalent au calcul avec un plan incliné (Haiun, 2014). Le mécanisme de rupture tel que décrit dans la NF P94-281 et comportant une surface de rupture verticale, est représenté à la Figure 3. La surface de rupture relie le bout du talon de la semelle avec la surface du remblai.

De manière analogue à ce qui est réalisé pour le mécanisme avec écran incliné, le calcul des forces appliquées au système nécessite celui des forces dues au poids du mur, comprenant le poids du voile et le poids de la semelle, au poids propre du coin de sol mobilisé et à l'action de la poussée.

Seul un coefficient de poussée pour les milieux pesants est déterminé à l'aide des tables de (Kerisel & Absi, 1990).

L'orientation de l'action de la poussée, définie par l'angle  $\delta$ , est comprise entre 0 et  $2/3 \varphi$ .

La combinaison de ces actions permet d'obtenir les efforts verticaux et horizontaux et le moment

appliqués au système. Il est alors possible de calculer l'excentrement et l'inclinaison du chargement.

Le mécanisme ainsi décrit est systématiquement affleurant et considère la mobilisation d'une zone quadrilatérale de remblai, en conséquence la définition du mécanisme et des aires à prendre en compte sont simplifiées. De plus, il n'est pas nécessaire de déterminer d'angle d'inclinaison de la rupture  $\theta$ , la poussée s'appliquant sur la surface de rupture verticale avec un unique coefficient de poussée.

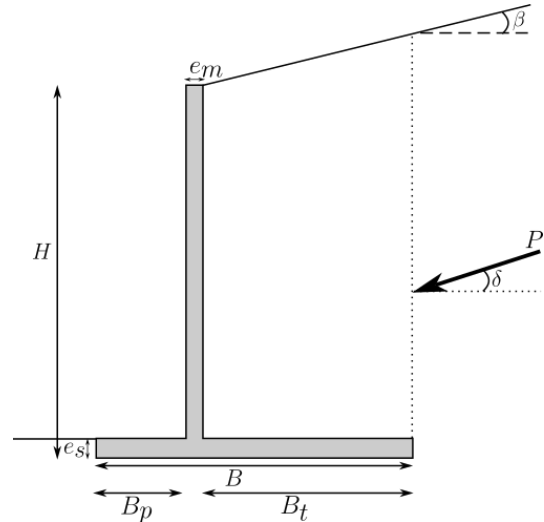


Figure 3. Schéma du mécanisme de rupture par un écran vertical (d'après (NF P94-281, 2014)).

Tableau 2. Inclinaison des actions de poussée sur l'écran fictif vertical (NF P94-281, 2014).

	$H_v \leq B_t \tan \theta$	$H_v \geq B_t \tan \theta$
$\delta$	$\beta$	$\beta + (\delta_0 - \beta) \left(1 - \frac{B_t \tan \theta}{H_v}\right)^2$

où  $H_v$  (m) est la hauteur du voile,  $B_t$  (m) est la longueur du talon,  $\delta_0$  (rad) prend la valeur maximale entre  $\beta$  et  $2/3.\varphi'$  et  $\theta$  (rad) est l'inclinaison fictive du remblai telle que :

$$\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} + \frac{\arcsin\left(\frac{\sin \beta}{\sin \varphi'}\right) - \beta}{2} \quad (2)$$

## 4 RESULTATS

### 4.1 Paramètres considérés

En se basant sur les règles de dimensionnement courantes d'un mur en béton armé énoncées dans le guide du SETRA (SETRA, 1973), on considère pour notre étude paramétrique un mur de hauteur  $H$  valant 6 m, des épaisseurs de voile  $e_m$  et de semelle  $e_s$  égales à  $H/12$  (0,50 m), une largeur de semelle  $B$  égale à  $0,35H$  (2,10 m) ou  $0,6H$  (3,60 m). On étudie une gamme étendue de largeurs de patins  $B_p$  comprises

entre  $B/1,5$  et  $B/20$ . La largeur du talon  $B_t$  est déduite de celles de la semelle, du patin et du voile.

Les paramètres mécaniques pris en compte sont un poids volumique du béton de  $25 \text{ kN.m}^{-3}$ , un poids volumique du remblai  $\gamma$  de  $20 \text{ kN.m}^{-3}$  et un comportement purement frottant du terrain. L'angle de frottement interne  $\varphi'$  est pris entre  $25$  et  $40^\circ$ . Des angles de frottement inférieurs à  $25^\circ$  ont été testés mais les configurations testées n'étaient pas justifiées vis-à-vis du glissement. Les calculs sont menés considérant une absence d'eau.

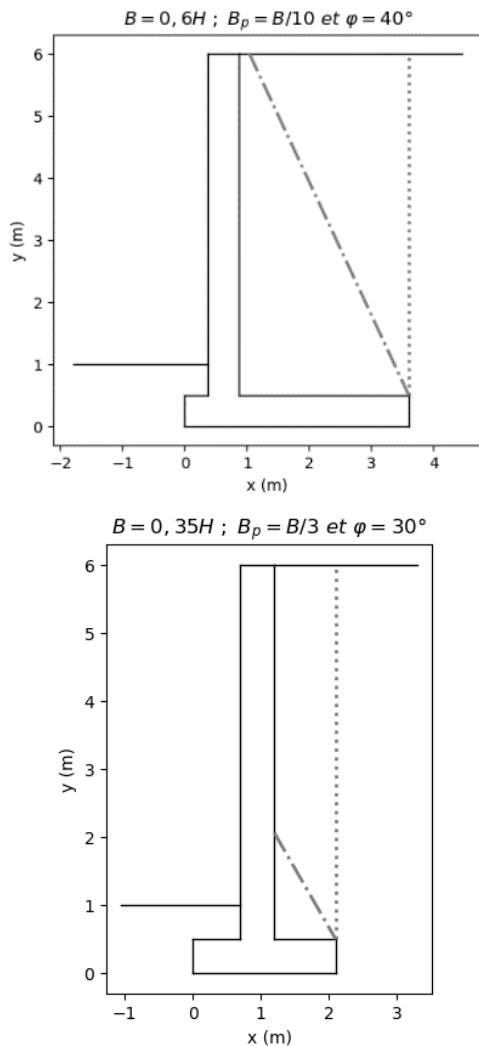


Figure 4. Schémas représentant la diversité des configurations étudiées.

Les résultats considérés sont la norme de la force appliquée, son inclinaison et son excentrement. Les variations relatives de la norme et de l'inclinaison sont calculées. Pour l'excentrement, le rapport entre la différence des excentrements et la largeur de la semelle  $B$  est calculé. La valeur fournie dans tous les cas indique la variation relative du résultat obtenu par la méthode de calcul reposant sur l'écran fictif vertical par rapport à celui obtenu par la méthode de calcul reposant sur l'écran fictif incliné.

Les tableaux de résultats présentent sous fond gris ceux pour lesquels le calcul à l'aide d'un écran fictif incliné remonte en surface (Figure 1). Les résultats sur fond blanc correspondent alors à un mécanisme entièrement compris sous la surface du remblai (Figure 2).

Certaines configurations ne vérifient pas les conditions de stabilité en glissement ou donnent un excentrement irréaliste. Pour ces cas, la valeur « X » est indiquée dans les tableaux.

#### 4.2 Résultats à l'ELS

Pour le calcul à l'ELS, l'ensemble des coefficients partiels sont pris égaux à 1. Les résultats obtenus dans le cas  $B=0,6H$  et  $B=0,35H$  sont sensiblement identiques. Ils sont présentés pour  $B=0,6H$ .

Tableau 3. Différence des résultantes des forces (% de variation pour l'écran vertical par rapport à l'écran incliné) à l'ELS dans le cas  $B=0,6H$ .

$\varphi$	$B/1,5$	$B/2$	$B/3$	$B/5$	$B/10$	$B/20$
25	X	0,10	0,08	0,05	0,02	0,01
27,5	0,08	0,12	0,09	0,05	0,02	0,01
30	0,10	0,14	0,09	0,04	0,01	0,00
32,5	0,12	0,14	0,09	0,03	0,01	0,00
35	0,13	0,14	0,08	0,02	0,00	0,00
37,5	0,12	0,14	0,06	0,01	0,00	0,00
40	0,12	0,12	0,05	0,00	0,00	0,00

Tableau 4. Différence des inclinaisons (% de variation pour l'écran vertical par rapport à l'écran incliné) à l'ELS dans le cas  $B=0,6H$ .

$\varphi$	$B/1,5$	$B/2$	$B/3$	$B/5$	$B/10$	$B/20$
25	X	-1,13	-0,81	-0,46	-0,23	-0,14
27,5	-1,09	-1,16	-0,78	-0,40	-0,16	-0,08
30	-1,13	-1,16	-0,72	-0,32	-0,10	-0,04
32,5	-1,16	-1,13	-0,64	-0,23	-0,05	-0,01
35	-1,16	-1,08	-0,54	-0,15	-0,01	0,00
37,5	-1,13	-1,00	-0,44	-0,08	0,00	0,00
40	-1,07	-0,90	-0,33	-0,03	0,00	0,00

Tableau 5. Différence des excentrements (% de variation pour l'écran vertical par rapport à l'écran incliné) à l'ELS dans le cas  $B=0,6H$ .

$\varphi$	$B/1,5$	$B/2$	$B/3$	$B/5$	$B/10$	$B/20$
25	X	-1,14	-0,72	-0,38	-0,18	-0,11
27,5	-1,22	-1,07	-0,63	-0,30	-0,12	-0,06
30	-1,16	-0,98	-0,54	-0,23	-0,07	-0,02
32,5	-1,09	-0,88	-0,45	-0,16	-0,03	0,00
35	-1,00	-0,78	-0,35	-0,10	-0,01	0,00
37,5	-0,91	-0,67	-0,27	-0,05	0,00	0,00
40	-0,82	-0,57	-0,19	-0,02	0,00	0,00

### 4.3 Résultats à l'ELU

Dans une combinaison donnée, les différents coefficients partiels doivent désigner des actions d'origine et de nature différentes, ce qui exclut par exemple d'appliquer deux coefficients partiels différents sur les composantes horizontales et verticales d'une même action (NF EN 1997, 2014). Ainsi, on ne peut pas considérer la composante verticale de la poussée des terres comme une action stabilisante et sa composante horizontale comme une action déstabilisante. Pour les actions permanentes considérées dans le cadre de cette étude, on applique un facteur partiel égal à 1,00 pour les actions favorables et 1,35 pour les actions défavorables. Le cas considérant la poussée favorable étant équivalent à l'ELS, on étudie le cas pour lequel la poussée est considérée défavorable. Les actions dues aux poids du mur et du sol sont considérées favorables.

Tableau 6. Différence des résultantes des forces (% de variation pour l'écran vertical par rapport à l'écran incliné) à l'ELU dans le cas  $B=0,35H$ .

$\varphi$	$B/1,5$	$B/2$	$B/3$	$B/5$	$B/10$	$B/20$
25	X	X	X	X	X	X
27,5	X	X	X	X	X	X
30	X	X	-10,39	-12,03	-12,90	X
32,5	X	-7,79	-10,78	-12,36	-13,17	-13,47
35	-3,56	-8,16	-11,14	-12,65	-13,40	-13,66
37,5	-3,77	-8,51	-11,46	-12,90	-13,56	-13,78
40	-3,99	-8,84	-11,74	-13,09	-13,66	-13,83

Tableau 7. Différence des inclinaisons (% de variation pour l'écran vertical par rapport à l'écran incliné) à l'ELU dans le cas  $B=0,35H$ .

$\varphi$	$B/1,5$	$B/2$	$B/3$	$B/5$	$B/10$	$B/20$
25	X	X	X	X	X	X
27,5	X	X	X	X	X	X
30	X	X	9,21	10,53	11,26	X
32,5	X	7,02	9,43	10,72	11,41	11,68
35	3,35	7,25	9,65	10,89	11,55	11,80
37,5	3,51	7,49	9,86	11,06	11,66	11,88
40	3,68	7,73	10,06	11,20	11,75	11,94

Tableau 8. Différence des excentremets (% de variation pour l'écran vertical par rapport à l'écran incliné) à l'ELU dans le cas  $B=0,35H$ .

$\varphi$	$B/1,5$	$B/2$	$B/3$	$B/5$	$B/10$	$B/20$
25	X	X	X	X	X	X
27,5	X	X	X	X	X	X
30	X	X	6,76	7,28	7,57	X
32,5	X	5,19	6,25	6,78	7,10	7,23
35	2,62	4,81	5,83	6,37	6,69	6,83
37,5	2,44	4,49	5,48	6,01	6,33	6,47
40	2,30	4,23	5,18	5,70	6,01	6,15

Tableau 9. Différence des résultantes des forces (% de variation pour l'écran vertical par rapport à l'écran incliné) à l'ELU dans le cas  $B=0,6H$ .

$\varphi$	$B/1,5$	$B/2$	$B/3$	$B/5$	$B/10$	$B/20$
25	X	X	X	-13,54	-13,42	-13,24
27,5	X	-11,69	-13,29	-13,55	-13,30	-13,06
30	-8,40	-11,98	-13,41	-13,49	-13,10	-12,78
32,5	-8,73	-12,22	-13,46	-13,35	-12,80	-12,41
35	-9,04	-12,42	-13,45	-13,13	-12,42	-11,94
37,5	-9,32	-12,57	-13,36	-12,82	-11,93	-11,44
40	-9,58	-12,67	-13,19	-12,41	-11,40	-10,92

Tableau 10. Différence des inclinaisons (% de variation pour l'écran vertical par rapport à l'écran incliné) à l'ELU dans le cas  $B=0,6H$ .

$\varphi$	$B/1,5$	$B/2$	$B/3$	$B/5$	$B/10$	$B/20$
25	X	X	X	12,12	12,13	12,03
27,5	X	10,25	11,71	12,1	12,01	11,85
30	7,45	10,4	11,76	12,04	11,83	11,60
32,5	7,64	10,54	11,79	11,93	11,58	11,27
35	7,83	10,66	11,78	11,76	11,25	10,86
37,5	8,02	10,77	11,73	11,52	10,83	10,41
40	8,22	10,86	11,64	11,19	10,36	9,96

Tableau 11. Différence des excentremets (% de variation pour l'écran vertical par rapport à l'écran incliné) à l'ELU dans le cas  $B=0,6H$ .

$\varphi$	$B/1,5$	$B/2$	$B/3$	$B/5$	$B/10$	$B/20$
25	X	X	X	5,34	5,41	5,43
27,5	X	4,56	4,90	5,07	5,14	5,15
30	3,53	4,27	4,64	4,82	4,88	4,89
32,5	3,30	4,03	4,41	4,58	4,64	4,64
35	3,11	3,82	4,20	4,36	4,40	4,39
37,5	2,95	3,65	4,01	4,15	4,16	4,15
40	2,82	3,49	3,83	3,93	3,92	3,93

## 5 DISCUSSION

A l'ELS, la variation des résultantes des forces appliquées au système reste toujours strictement inférieure à 0,5%. La variation d'inclinaison du chargement ne dépasse pas 1,5% pour l'ensemble des valeurs testées. La variation relative d'excentrement entre les deux méthodes de calcul, est strictement inférieure à 2%. Ces résultats sont concordants avec ceux présentés par Maurel et Haiun (2023).

Ainsi, à l'ELS, les résultats obtenus permettent de valider l'équivalence des deux mécanismes d'une part l'écran fictif incliné et d'autre part l'écran fictif vertical. Le mécanisme de rupture considérant un écran fictif vertical permet une simplification des calculs à mener tout en fournissant un résultat identique à celui donné par le mécanisme plus rigoureusement défini par un écran fictif incliné. Il est néanmoins intéressant de souligner que les contributions des efforts verticaux et horizontaux du poids propre du coin de sol et de la poussée sont largement différents pour les deux méthodes de calcul. Ce constat oblige donc à s'intéresser à l'influence de l'ajout de coefficients partiels à l'ELU et du choix des actions à considérer favorables ou défavorables pour le mécanisme considérant un écran fictif vertical.

A l'ELU, la variation des résultantes des forces appliquées au système reste toujours strictement inférieure à 14% : la composante verticale de la configuration avec l'écran fictif vertical est toujours inférieure à la configuration avec l'écran fictif incliné. L'inclinaison du chargement présente une variation ne dépassant pas 12,5% pour l'ensemble des valeurs testées : l'inclinaison de la résultante des forces dans la configuration de l'écran fictif vertical est toujours plus grande que celle de la résultante des forces dans la configuration de l'écran fictif incliné. La variation de l'excentrement relatif est comprise entre 2 et 8% : l'excentrement de la résultante des forces dans la configuration de l'écran fictif vertical est toujours plus grand que celui de la résultante des forces dans la configuration de l'écran fictif incliné.

Ces différents constats, transcrits à la Figure 5, ne permettent pas de déterminer la configuration dimensionnante : en effet pour la configuration de l'écran fictif incliné, la résultante des forces est la plus grande, tandis que l'inclinaison et l'excentrement du chargement sont les plus grands pour la configuration de l'écran fictif vertical.

Par conséquent, pour juger de la configuration dimensionnante, il est proposé d'utiliser le concept de taux de mobilisation  $\alpha$  dont le calcul est présenté ci-après.

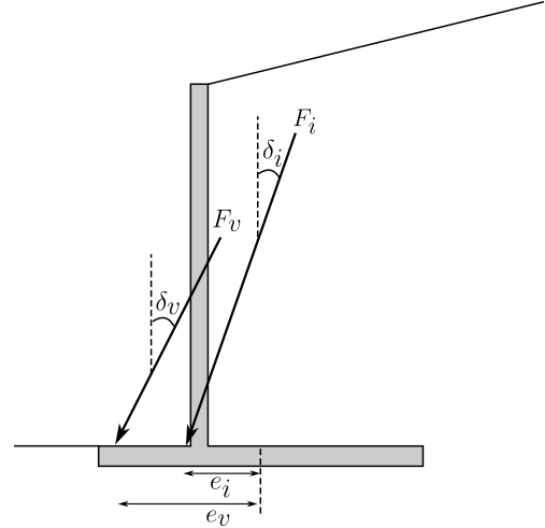


Figure 5. Schéma de synthèse de la résultante des forces s'appliquant sur le mur avec un écran fictif vertical (indice « v ») ou incliné (indice « i ») considérant les coefficients partiels à l'ELU d'une poussée défavorable.

On rappelle que la vérification de la portance aux états limites ultimes peut s'écrire :

$$V_d \leq R_{v;d} \quad (3)$$

où  $V_d$  est la valeur de calcul de la charge verticale transmise par le mur de soutènement au terrain en ne tenant pas compte de la poussée d'Archimède et  $R_{v;d}$  est la valeur de calcul de la résistance ultime du terrain sous le mur telle que :

$$R_{v;d} = \frac{A i_e q_{net}}{\gamma_{R;v} \gamma_{R;d;v}} = \frac{A i_e k_p p_{le}^* i_\delta}{\gamma_{R;v} \gamma_{R;d;v}} \quad (4)$$

où  $A$  est la largeur de la semelle,  $\gamma_{R;v}$  est le facteur partiel de résistance à la portance,  $\gamma_{R;d;v}$  est le coefficient de modèle,  $k_p$  est le facteur de portance pressiométrique,  $p_{le}^*$  est la valeur de la pression limite nette équivalente,  $i_e$  et  $i_\delta$  sont des coefficients de réduction de portance liés à l'excentrement du chargement et de son inclinaison par rapport à la verticale respectivement. Leurs expressions pour un sol frottant sont :

$$i_e = 1 - 2 \frac{e}{B} \quad (5)$$

$$i_\delta = \left(1 - \frac{2\delta_d}{\pi}\right)^2 - \frac{2\delta_d}{\pi} \left(2 - 3 \frac{2\delta_d}{\pi}\right) e^{-D_e/B} \quad (6)$$

considérant l'inclinaison du chargement  $\delta_d < \pi/4$ .

On considère que le patin de la semelle n'est pas encastré :

$$D_e = 0 \quad (7)$$

On définit le taux de mobilisation tel que :

$$\alpha = \frac{V_d}{R_{v,d}} \quad (8)$$

$\alpha$  doit être inférieur ou égal à 1 pour que la portance soit vérifiée aux états limites ultimes. Le taux de mobilisation dimensionnant sera alors le plus petit des deux. On calcule finalement :

$$\frac{\alpha_{vertical}}{\alpha_{incliné}} = \frac{V_{d,vertical} R_{v,d,incliné}}{R_{v,d,vertical} V_{d,incliné}} \quad (9)$$

$$\frac{\alpha_{vertical}}{\alpha_{incliné}} = \frac{V_{d,vertical} (i_e i_s)_{incliné}}{(i_e i_s)_{vertical} V_{d,incliné}} \quad (10)$$

Il est alors possible d'examiner quelle configuration est dimensionnante.

Tableau 12. Ratio des taux de mobilisation (de l'écran vertical par rapport à l'écran incliné) à l'ELU dans le cas  $B=0,35H$ .

$\varphi$	$B/1,5$	$B/2$	$B/3$	$B/5$	$B/10$	$B/20$
25	X	X	X	X	X	X
27,5	X	X	X	X	X	X
30	X	X	3,93	5,09	11,72	X
32,5	X	1,94	2,01	2,20	2,54	2,88
35	1,37	1,53	1,59	1,68	1,81	1,91
37,5	1,23	1,35	1,40	1,45	1,52	1,57
40	1,16	1,25	1,29	1,32	1,37	1,40

Tableau 13. Ratio des taux de mobilisation (de l'écran vertical par rapport à l'écran incliné) à l'ELU dans le cas  $B=0,6H$ .

$\varphi$	$B/1,5$	$B/2$	$B/3$	$B/5$	$B/10$	$B/20$
25	X	X	X	1,29	1,28	1,27
27,5	X	1,31	1,26	1,23	1,22	1,22
30	1,27	1,24	1,20	1,18	1,17	1,17
32,5	1,21	1,18	1,15	1,14	1,14	1,13
35	1,16	1,14	1,12	1,11	1,10	1,10
37,5	1,12	1,10	1,09	1,08	1,08	1,08
40	1,09	1,08	1,06	1,06	1,06	1,06

Les valeurs comprises dans le Tableau 12 et le Tableau 13 sont toutes strictement supérieures à 1. Cela indique que le taux de mobilisation calculé pour l'écran fictif vertical est toujours supérieur à celui calculé pour l'écran fictif incliné. Ainsi, pour une même configuration, la sécurité calculée est supérieure lorsque la méthode considérant un écran fictif incliné est utilisée. On en déduit que pour une même exigence de niveau de sécurité, le dimensionnement calculé à partir de la méthode de l'écran fictif incliné sera plus économique que celui calculé à partir de la méthode de l'écran fictif vertical.

Par ailleurs, on relève que les deux méthodes sont d'autant plus équivalentes que l'angle de frottement du terrain est grand.

## 6 CONCLUSIONS

Le calcul de la poussée sur un mur de soutènement en T selon la méthode de l'écran fictif incliné et selon la méthode de l'écran fictif vertical donnent des résultats identiques à l'ELS et proches à l'ELU. Considérant que « la connaissance des conditions de terrain dépend de l'importance et de la qualité des reconnaissances géotechniques et que cette connaissance et le contrôle de la qualité de la réalisation des travaux sont plus importants pour satisfaire les exigences fondamentales que la précision des modèles de calcul et des facteurs partiels » (NF EN 1997-1, 2005), les résultats obtenus à l'ELU restent satisfaisants dans le cadre du dimensionnement des murs de soutènement.

Dans l'étude de cas présentée, aux ELU, l'utilisation de la méthode de l'écran fictif incliné donne une amplitude de la résultante des charges sur la semelle plus élevée que la méthode de l'écran fictif vertical. Néanmoins, la méthode de l'écran fictif vertical s'est révélée être plus défavorable pour la majorité des configurations testées à l'ELU car elle accroît les effets de l'excentrement et de l'inclinaison du chargement.

Dans une perspective de construction durable des ouvrages de génie civil, il est important de dimensionner ces derniers en optimisant les quantités de matériaux à mettre en œuvre. Vis-à-vis de cet objectif, ce travail permet d'attirer l'attention du concepteur sur la nécessité de considérer le surdimensionnement et le surcoût qui peuvent être obtenus par la méthode de l'écran fictif vertical.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Burlon, S. (2023). Un exemple d'intégration numérique des coefficients de poussée et de butée en milieux pesants. *Revue Française de Géotechnique*, 174, 3. <https://doi.org/10.1051/geotech/2023017>
- Caquot, A., & Kerisel, J. (1948). *Traité de Mécanique Des Sols*.
- Haiun, G. (2014). *EUROCODE 7 : CALCUL GEOTECHNIQUE Le lien avec les règles françaises*.
- Kerisel, J., & Absi, E. (1990). *Tables de poussée et de butée des terres* (3<sup>e</sup> éd.).
- Maurel, C., & Haiun, G. (2023, septembre 25). *Design of gravity walls : 50 years of French practice* [Workshop]. Charles-Augustin Coulomb

- a geotechnical tribute, Paris. <https://www.cfms-sols.org/organisees-par-le-cfms/charles-augustin-coulomb-un-hommage-geotechnique>  
*NF EN 1997*. (2014). <https://norminfo.afnor.org>  
*NF P94-281*. (2014).  
<https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf->

p94281/justification-des-ouvrages-geotechniques-normes-dapplication-nationale-de-1/fa174709/43117  
SETRA. (1973). *Mur 73 Ouvrages de Soutènement*.