

Prosheet

B. Manuel technique

| | |
|---|----------|
| 1. Objet du logiciel | 2 |
| 2. Aspects théoriques | 2 |
| 2.1. Général | 2 |
| 2.2. Méthodes de calcul | 3 |
| 2.2.1. Méthode classique | 3 |
| 2.2.1.1. Écran autostable | 3 |
| 2.2.1.2. Mur appuyé (tiranté ou butonné) | 3 |
| 2.2.1.3. Contre-écran | 4 |
| 2.2.1.4. Écran principal et contre-écran | 5 |
| 2.2.2. Méthode Eurocode | 5 |
| 2.2.2.1. Écran autostable | 6 |
| 2.2.2.2. Mur appuyé (ancré ou butonné) | 7 |
| 2.2.2.3. Mur d'ancrage | 7 |
| 2.2.2.4. Écran principal et contre-écran | 8 |
| 2.3. Pressions limites de poussée et de butée des sols | 8 |
| 2.3.1. Terrain naturel horizontal ou incliné | 8 |
| 2.3.2. Remblaiement | 9 |
| 2.3.3. Risberme | 9 |
| 2.3.4. Sur-excavation | 10 |
| 2.4. Charges externes | 10 |
| 2.4.1. Charge de Caquot | 10 |
| 2.4.2. Charge Boussinesq | 10 |
| 2.4.3. Charges linéaires et réparties | 10 |
| 2.4.4. Charge des vagues (méthode Sainflou, PIANC) | 10 |
| 2.5. Séisme | 12 |
| 2.5.1. Approche Mononobé-Okabé (1924) | 12 |
| 2.5.1.1. Types de comportement du sol dans des conditions sismiques | 12 |
| 2.5.1.2. Modification de la poussée limite (Eurocode 8 - Annexe E - §E.4) | 13 |
| 2.5.1.3. Modification de la butée limite (Eurocode 7 - Annexe E - §E.4) | 13 |
| 2.5.1.4. Effet de la cohésion | 13 |
| 2.5.1.5. Effets hydrodynamiques (modèle Westergaard) | 14 |
| 2.5.2. Approche de Lancellotta (2002) | 14 |
| 2.6. Vérification de la stabilité du bloc d'ancrage (Kranz) | 15 |
| 2.6.1. Méthode de calcul | 15 |
| 2.6.2. Prise en compte des conditions sismiques | 16 |
| 2.6.3. Contre-écran | 17 |
| 2.7. Vérification de l'équilibre vertical | 17 |

1. Objet du logiciel

Prosheets est un logiciel qui permet d'analyser l'équilibre des écrans en palplanches autostables, appuyés (ancrés ou butonnés) et les projets double-écran.

Deux méthodes de calcul sont disponibles : Classique et Eurocode.

La méthode classique consiste à calculer l'équilibre des écrans sans aucune pondération sur les actions mais avec un facteur global possible sur la butée des terres.

La méthode Eurocode consiste à calculer l'équilibre des écrans avec pondération des actions et des résistances. Les vérifications demandées par la norme NF P4-282 de l'Eurocode 7 (vérifications de la butée, équilibre vertical, et vérification du Kranz) sont intégrées dans Prosheets. Les effets des remblais et des talus ainsi que les calculs sismiques sont également intégrés.

2. Aspects théoriques

2.1. Général

Tous les cas envisagés dans Prosheets supposent que :

- Le sol derrière de l'écran est systématiquement en état limite de poussée. La contrebutée (pression passive du sol) est également prise en compte derrière l'écran dans le cas du mode de fixation appuyé en pied.
- Le sol devant de l'écran est systématiquement considéré en pression limite de butée.

Par conséquent, il n'y a pas de relation directe entre les pressions et les déplacements à chaque niveau de l'écran contrairement à la méthode MISS.

Il est important de noter que tous les calculs sont effectués à l'ELU pour les deux méthodes de calcul (classique et Eurocode). Le calcul tient compte de l'écran, les sols multicouches, le terrain naturel variable du sol (risberme à l'aval ou talus à l'arrière), les appuis (butons ou ancrages) et les charges externes appliquées sur l'écran ou sur le sol.

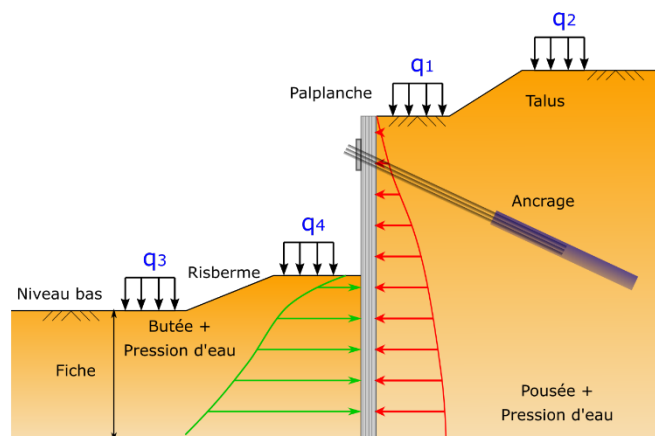


Figure 1. Section standard pour un mur ancré

Étapes de calcul :

1. Calcul des pressions actives et passives du sol.
2. Calcul de la fiche de l'écran nécessaire à l'équilibre et des réactions aux appuis (s'ils existent)
3. Calcul des diagrammes d'efforts internes :
 - a. Effort tranchant
 - b. Moment fléchissants
 - c. Effort normal
4. Calcul du diagramme de rotation et des déplacements horizontaux.

2.2. Méthodes de calcul

2.2.1. Méthode classique

La méthode classique vise à obtenir l'équilibre de l'écran sans pondération sur les actions mais avec une sécurité minimale globale sur la butée (facteur $S_{f,min}$). Aucun code réglementaire est utilisé dans cette méthode.

En général, un incrément de longueur de la fiche (Δe) peut être défini par l'utilisateur à partir d'un niveau minimum de fiche assurant l'équilibre de l'écran. Un nouveau facteur S_f est ensuite déduit pour assurer l'équilibre de l'écran.

Comme la butée est supposée être égale à la butée limite, l'équilibre peut ne pas être atteint dans certains cas en raison d'une butée excessive du sol. Dans ce cas, il est recommandé d'augmenter manuellement la sécurité globale sur la butée pour la réduire. Cela est parfaitement cohérent avec le principe de calcul car la butée est une réaction et non pas une action.

Dans certains cas, l'équilibre ne peut être atteint car la butée ne suffit pas à compenser le moment global généré par les actions appliquées sur l'écran. Dans ce cas, il est conseillé de vérifier les paramètres de résistance de la couche de sol à l'aval ou le facteur de sécurité global réduit sur la butée.

L'équilibre horizontal des forces et l'équilibre des moments sont systématiquement assurés pour tous les cas.

2.2.1.1. Écran autostable

L'écran autostable est soumis à la poussée du sol (P_a) et à d'autres actions extérieures éventuelles. Il est équilibré par la butée (P_b) à l'aval. Une contrebutée (C_h) appliquée au point C est nécessaire pour compenser les forces horizontales générées par le reste des actions appliquées sur l'écran.

Le point C est recherché rigoureusement pour assurer l'équilibre des moments de l'écran. Ensuite, la valeur de C_h est prise égale à l'effort tranchant au point C pour garantir l'équilibre de forces horizontales. La rotation et le déplacement sont supposés nuls au point C.

Il est conseillé d'envisager une surlongueur pour garantir la mobilisation de la contrebutée nécessaire à l'équilibre. Ceci peut être fait à l'aide du paramètre Δe (surlongueur de fiche). Un nouveau calcul d'équilibre sera ensuite effectué automatiquement pour rallonger la longueur de l'écran et déduire un nouveau facteur de sécurité global appliqué sur la butée. Par construction, le nouveau facteur de sécurité sera supérieur ou égale au niveau de sécurité minimal défini par l'utilisateur.

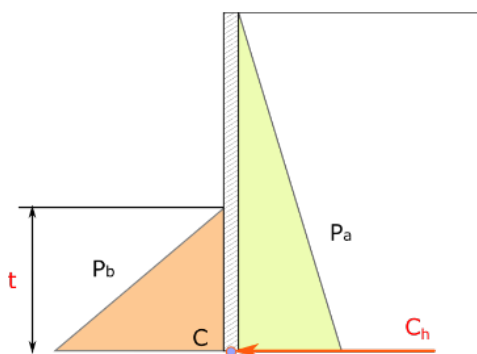


Figure 2. Écran autostable (méthode classique)

2.2.1.2. Mur appuyé (tiranté ou butonné)

Pour la méthode classique, il n'y a pas de différence entre un écran ancré et un écran butonné.

Un écran appuyé est soumis à la pression active du sol (P_a) et à d'autres actions extérieures éventuelles. Il est équilibré par la pression passive de la terre (P_b) sur le côté aval et la réaction d'appui (ancrage ou buton). La fixation en pied d'écran peut être définie comme libre ou appuyée. Une surlongueur peut être définie dans le cas d'un appui libre en pied d'écran pour en déduire un nouveau facteur de sécurité global sur la butée (S_f). Par construction, le nouveau facteur de sécurité sera supérieur ou égale au niveau de sécurité minimal défini par l'utilisateur.

En effet, la méthode de calcul en appuyé en pied d'écran ne permet pas de déduire un nouveau coefficient de sécurité car l'équilibre de la poutre supérieure dépend à la fois de cette sécurité et de la réaction dans le tirant.

- **Libre en pied d'écran**

Le niveau inférieur de l'écran (P) est recherché rigoureusement pour assurer l'équilibre de moments de l'écran. La réaction d'ancrage (T_A) est déduite de l'équilibre des forces horizontales. Le déplacement est supposé nul au niveau de l'appui et au niveau inférieur de l'écran.

- **Appuyé en pied d'écran**

Ce cas suppose qu'il y a une contrebutée disponible au point C, ce qui nécessite une équation supplémentaire : hypothèse de Blum qui suppose que le point de pression différentielle nulle correspond au point de moment fléchissant nul.

Lorsque le point de pression différentielle nulle (O) est retrouvé, la réaction d'appui est calculée à partir de l'équilibre de moments de la « poutre supérieure » (entre le niveau supérieur de l'écran et le niveau O). Le cisaillement à ce point-là est déduit et est intégré dans l'équilibre de la "poutre inférieure". Ensuite, le point C est recherché pour assurer l'équilibre de moments de la « poutre inférieure ». Enfin, la contrebutée nécessaire est calculée pour assurer l'équilibre des forces horizontales.

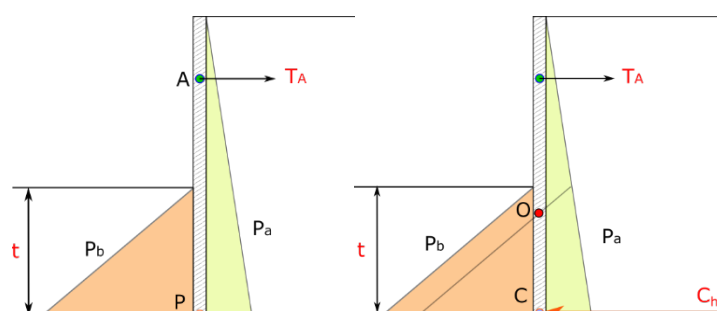


Figure 3. Écran appuyé (méthode classique) : fixation libre en pied (à gauche) appuyé en pied (à droite)

2.2.1.3. Contre-écran

Le contre-écran est soumis à une réaction d'appui (action), à une pression de poussée (P_a) et à d'autres actions extérieures et est équilibrée par une pression de butée (P_b). La sécurité globale sur la pression de butée peut être définie ainsi qu'une surlongueur pour calculer un nouveau facteur de sécurité globale sur la butée (S_r). La réaction d'ancrage est considérée comme une donnée d'entrée. La fixation en pied d'écran peut être définie comme libre ou appuyée.

- **Libre en pied d'écran**

Le niveau inférieur de l'écran (P) est recherché rigoureusement pour assurer l'équilibre des forces horizontales. Le niveau d'ancrage nécessaire (z_{A1}) est recherché pour assurer l'équilibre du moment global de l'écran.

- **Appuyé en pied d'écran**

Le niveau inférieur de l'écran (C) recherché rigoureusement pour assurer l'équilibre des moments de l'écran. La contrebutée est calculée pour assurer l'équilibre des forces horizontales. Le niveau d'ancrage n'est pas recalculé dans ce cas.

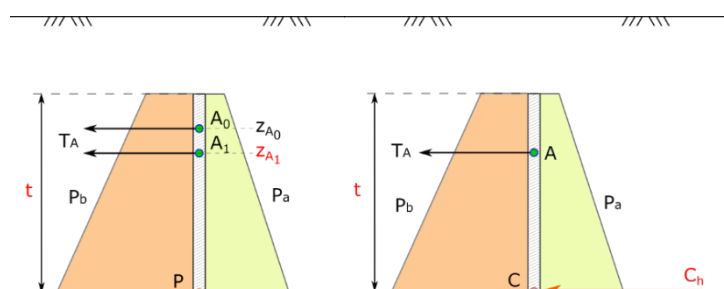


Figure 4. Contre-écran (méthode classique) : libre en pied (à gauche) et appuyé en pied (à droite)

2.2.1.4. Écran principal et contre-écran

L'écran principal sera toujours considéré sur à gauche et le contre-écran à droite.

- L'écran principal sera calculé de la même manière que l'écran ancré (§2.2.1.2).
- Le contre-écran sera calculé de la même manière qu'explicité dans §2.2.1.3).

L'équilibre de l'écran principal permet d'obtenir la réaction d'ancrage (T_A). L'équilibre du contre-écran sera calculé en tenant compte de cette réaction d'ancrage comme une donnée d'entrée (action). Par conséquent, il n'y a pas d'itération.

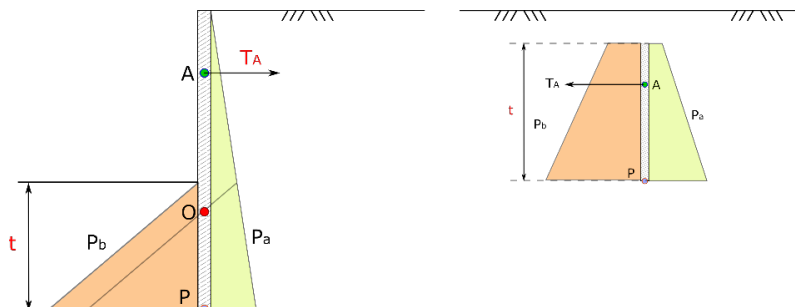


Figure 5. Écran principal et contre-écran (méthode classique)

2.2.2. Méthode Eurocode

La méthode Eurocode consiste à appliquer des facteurs partiels sur les valeurs caractéristiques des actions et des résistances pour en déduire leurs valeurs de calcul. Le tableau suivant montre toutes les valeurs des facteurs partiels intégrés dans Prosheets. L'utilisateur a toujours la possibilité de définir ses propres facteurs de sécurité partiels avec l'option "Personnalisé".

| | | | Approche | | | | |
|--|------------|-------------|-----------------------------|------|------|------|------|
| | | | Symbole | 1.1 | 1.2 | 2* | 3 |
| Poussée limite (déstabilisante) | | | $\gamma_{Pa,dst}$ | 1.35 | 1.00 | 1.35 | 1.00 |
| Poussée limite (stabilisante) | | | $\gamma_{Pa,stb}$ | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Butée limite | | | γ_{Pb} | 1.40 | 1.00 | 1.40 | 1.00 |
| Pression de l'eau (déstabilisante) | | | $\gamma_{Pw,dst}$ | 1.35 | 1.00 | 1.35 | 1.00 |
| Pression de l'eau (stabilisante) | | | $\gamma_{Pw,stb}$ | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Poids de l'écran | | | γ_w | 1.35 | 1.00 | 1.35 | 1.35 |
| Charges appliquées sur le sol | Permanente | Défavorable | $\gamma_{loads,soil,G,dst}$ | 1.35 | 1.00 | 1.35 | 1.00 |
| | | Favorable | $\gamma_{loads,soil,G,stb}$ | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| | Variable | Défavorable | $\gamma_{loads,soil,Q,dst}$ | 1.50 | 1.30 | 1.50 | 1.30 |
| | | Favorable | $\gamma_{loads,soil,Q,stb}$ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Charges appliquées sur l'écran | Permanente | Défavorable | $\gamma_{loads,wall,G,dst}$ | 1.35 | 1.00 | 1.35 | 1.35 |
| | | Favorable | $\gamma_{loads,wall,G,stb}$ | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| | Variable | Défavorable | $\gamma_{loads,wall,Q,dst}$ | 1.50 | 1.30 | 1.50 | 1.50 |
| | | Favorable | $\gamma_{loads,wall,Q,stb}$ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Cohésion drainée | | | γ_ϕ | 1.00 | 1.25 | 1.00 | 1.25 |
| Angle de frottement drainé | | | γ_c | 1.00 | 1.25 | 1.00 | 1.25 |
| Cohésion non drainée | | | γ_ϕ | 1.00 | 1.40 | 1.00 | 1.40 |
| Angle de frottement non drainé | | | γ_c | 1.00 | 1.40 | 1.00 | 1.40 |
| Réaction d'ancrage | | | γ_{anc} | 1.10 | 1.10 | 1.00 | 1.00 |
| Effort déstabilisant du bloc d'ancrage (Kranz) | | | γ_{krz} | 1.00 | 1.00 | 1.10 | 1.00 |

Tableau 1. Facteurs partiels pour chaque approche de l'Eurocode

Les pressions limites du sol sont pondérées par des facteurs de sécurité partiels proposés par l'Eurocode en fonction de l'approche de calcul.

$$P_{ad} = \begin{cases} \gamma_a P_a(\varphi, c) & \text{si Approche 1.1 ou 2} \\ P_a\left(\frac{\tan \varphi}{\gamma_\phi}, \frac{c}{\gamma_c}\right) & \text{si Approche 1.2 ou 3} \end{cases} \quad P_{bd} = \begin{cases} \frac{P_b(\varphi, c)}{\gamma_b} & \text{si Approche 1.1 ou 2} \\ P_b\left(\frac{\tan \varphi}{\gamma_\phi}, \frac{c}{\gamma_c}\right) & \text{si Approche 1.2 ou 3} \end{cases}$$

Où φ et c sont respectivement la valeur caractéristique de l'angle de frottement et de la cohésion (valeurs d'entrée).

Par défaut, la pression de l'eau est considérée comme stabilisante à l'aval, donc pondérée par $\gamma_{Pw,stab}$, et comme déstabilisante à l'arrière, donc pondérée par $\gamma_{Pw,dst}$.

Prosheets offre la possibilité de différencier le caractère stabilisant et déstabilisant des pressions actives de terre et d'eau pour les murs appuyés. La figure suivante précise les zones sur lesquelles les facteurs partiels stabilisants/déstabilisants sont appliqués si l'utilisateur le demande :

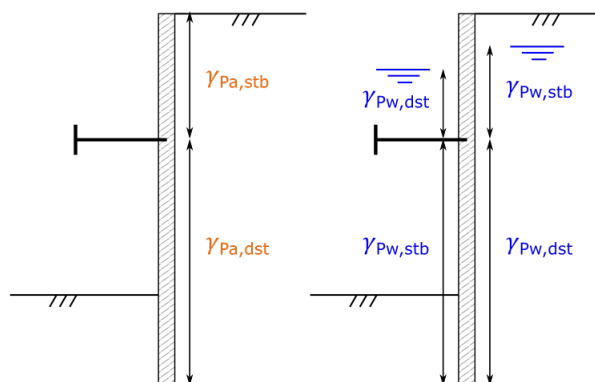


Figure 6. Régions d'application des facteurs partiels déstabilisateurs/stabilisateurs de la pression de poussée et de l'eau

2.2.2.1. Écran autostable

L'écran autostable est soumis à la poussée limite du sol ($P_{a,d}$) et à d'autres actions extérieures éventuelles. Il est équilibrée par la butée ($P_{b,d}$) sur le côté aval. Une contrebutée (C_h) au point C est nécessaire pour équilibrer les forces horizontales.

Le point C est recherché rigoureusement pour assurer l'équilibre des moments de l'écran. Ensuite, la valeur de C_h est prise égale à l'effort tranchant au point C pour garantir l'équilibre des forces horizontales.

La fiche est mesurée à partir du point de pression différentielle nulle (O) :

- f_0 correspond à la fiche minimale pour assurer l'équilibre global des moments de l'écran.
- f_b correspond à la fiche disponible (distance entre O et P)

L'Eurocode exige une surlongueur minimale de 20% sur f_0 , d'où la nécessité d'assurer la condition suivante : $f_b/f_0 \geq 1.20$. Ainsi, une fois le point C est atteint, le niveau P est déduit pour respecter cette condition.

L'Eurocode exige la vérification de la contrebutée nécessaire à l'équilibre ($C_{t,d}$) reste inférieure à la contrebutée disponible ($C_{m,d}$) sur $0.2f_0$ sous le point C : $C_{t,d} \leq C_{m,d}$.

La contrebutée est appliquée sur $0.4f_0$ autour du point C. Le taux de mobilisation de la contrebutée est obtenu à partir de la relation suivante : $\alpha = C_{t,d}/C_{m,d}$

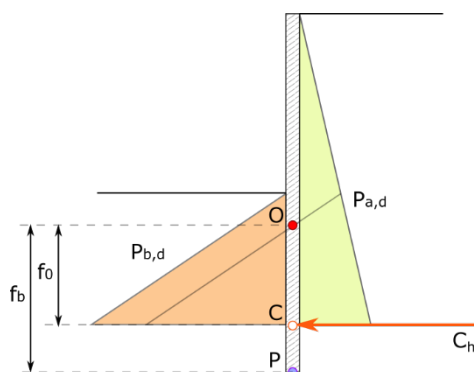


Figure 7. Écran autostable (méthode Eurocode)

2.2.2.2. Mur appuyé (ancré ou butonné)

L'Eurocode n'envisage pas une fixation appuyée le support de terre fixe, les écrans supportés ne sont disponibles qu'avec un support de terre gratuit en méthode Eurocode.

Le calcul de l'équilibre de l'écran est similaire à la méthode classique, mais en tenant compte des facteurs partiels de sécurité sur les actions et les résistances. Ainsi, les pressions actives et passives sont calculées en valeurs de calcul.

Le niveau inférieur de l'écran (P) est recherché rigoureusement pour assurer l'équilibre de l'élan global. La réaction d'ancrage (T_A) est déduite de l'équilibre des forces horizontales. Le déplacement est supposé nul au niveau de l'appui et au niveau inférieur de l'écran.

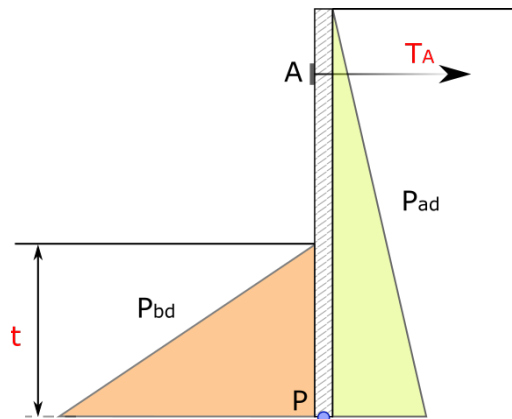


Figure 8. Mur ancré avec support de terre libre (méthode Eurocode)

2.2.2.3. Mur d'ancrage

Même si l'Eurocode ne se prononce pas sur le type de fixation pour les contre-écrans, nous pouvons traiter ce cas selon le même principe que la méthode classique mais en tenant compte des facteurs de pondération sur la pression du sol. Ce calcul est possible puisque que le T_A est une donnée d'entrée, contrairement au cas d'un écran ancré et d'un contre-écran présenté précédemment où le T_A est un résultat.

- **Libre en pied d'écran :**

Le niveau inférieur de l'écran (point P) fait l'objet de recherches rigoureuses pour assurer l'équilibre des forces horizontales. Le niveau d'ancrage est recalculé pour assurer l'équilibre de la dynamique globale (z_{A1}).

- **Appuyée en pied d'écran :**

Le niveau inférieur de l'écran (point C) est recherché rigoureusement pour assurer l'équilibre global des moments. La contrebutée est calculée pour assurer l'équilibre des forces horizontales. Le niveau d'ancrage n'est pas recalculé.

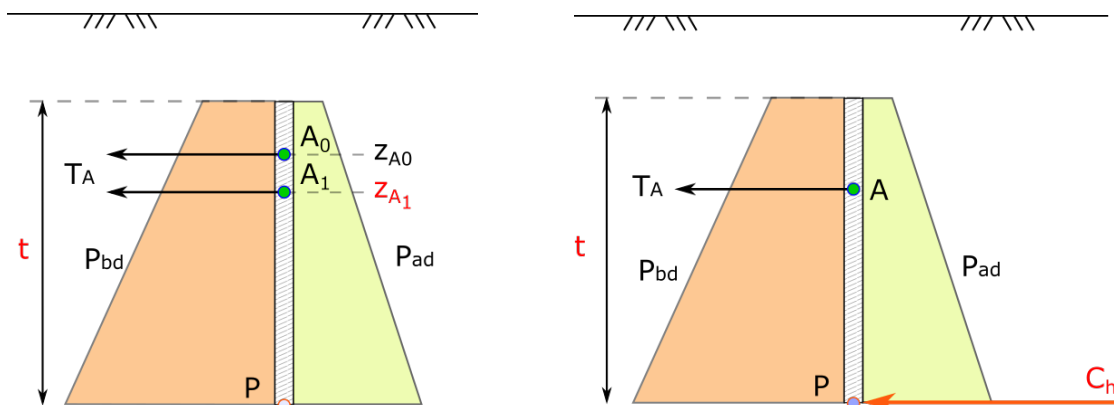


Figure 9. Contre-écran (méthode Eurocode) : libre en pied (à gauche) et appuyée en pied (à droite)

2.2.2.4. Écran principal et contre-écran

Le calcul de l'équilibre de l'écran de tête et du système de mur d'ancrage est similaire à la méthode classique, mais en tenant compte des facteurs partiels de sécurité sur les actions et sur les résistances. Ainsi, les pressions actives et passives de la terre sont calculées en valeurs nominales.

L'écran principal sera toujours considéré sur le côté gauche et l'écran d'ancrage sur le côté droit.

- L'écran de tête sera calculé de la même façon que l'écran ancré (§22.2.1.2).
- L'écran d'ancrage sera calculé de la même manière que l'écran d'ancrage (§2Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

L'équilibre de l'écran principal permet d'obtenir la réaction d'ancrage (T_A). L'équilibre du contre-écran est calculé en tenant compte de cette réaction d'ancrage en entrée. Par conséquent, il n'y a pas de processus d'itération.

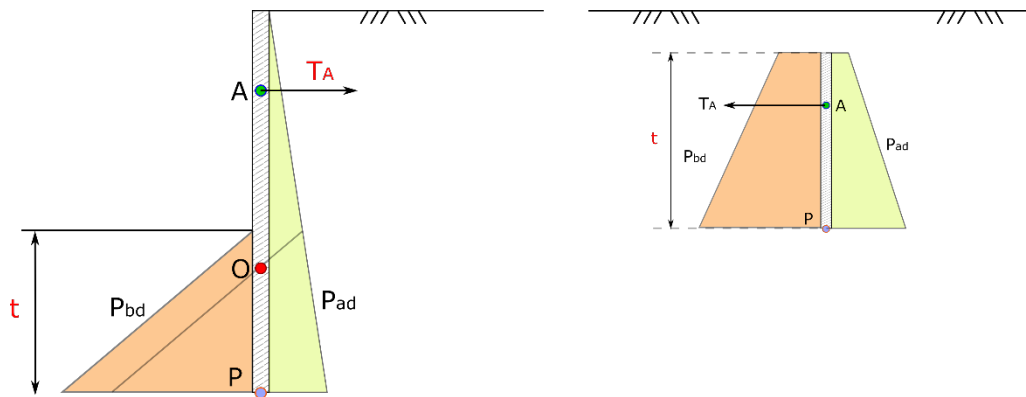


Figure 10. Écran principal et contre-écran (méthode Eurocode)

2.3. Pressions limites de poussée et de butée des sols

2.3.1. Terrain naturel horizontal ou incliné

Les pressions limites des sols sont calculées à partir des contraintes verticales effectives :

- Pression limite de poussée : $p_a = k_{a\gamma} \cdot \sigma'_v - k_{ac} \cdot c$
- Pression limite de butée : $p_b = k_{p\gamma} \cdot \sigma'_v + k_{pc} \cdot c$

Où :

| | |
|---------------|---|
| $k_{a\gamma}$ | coefficient de poussée appliqué sur γ ou γ' . |
| k_{ac} | coefficient de poussée appliqué sur c |
| $k_{p\gamma}$ | coefficient de butée appliqué sur γ ou γ'' . |
| k_{pc} | coefficient de butée appliqué sur c |
| c | cohésion du sol |

$k_{a\gamma}$ $k_{p\gamma}$ peut être défini par l'utilisateur (mode personnalisé). Le mode automatique permet de prendre les valeurs à partir des tables Kérisel-Absi pour un terrain horizontal ou incliné en tenant compte de l'inclinaison de l'écran par rapport à la verticale (λ) avec une limitation de 5° .

Selon l'Eurocode, une pression de poussée minimale doit être prise en compte pour éviter les valeurs négatives. Pour ce faire, on prend en compte un coefficient de pression de poussée minimale ($k_{a\gamma, \min}$ valeur par défaut = 0,10).

Les coefficients de poussée et butée appliqués sur la cohésion sont calculés à partir des expressions suivantes :

$$k_{ac} = \frac{1}{\tan \varphi} \left[\frac{\cos \delta_a - \sin \varphi \cos \alpha}{1 + \sin \varphi} e^{-(\alpha - \delta_a) \tan \varphi} \cos \delta_a - 1 \right]$$

$$k_{pc} = \frac{1}{\tan \varphi} \left[\frac{\cos \delta_p + \sin \varphi \cos \alpha}{1 - \sin \varphi} e^{(\alpha + \delta_p) \tan \varphi} \cos \delta_p - 1 \right]$$

$$\text{avec } \sin \alpha = \frac{\sin \delta}{\sin \varphi}$$

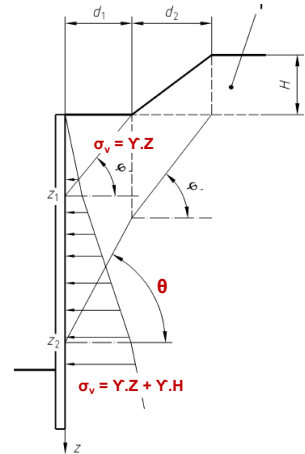
2.3.2. Remblaiement

Le remblai ne peut être défini qu'à l'arrière de l'écran principal. Son effet sera assimilé à une augmentation de la contrainte verticale effective ($\Delta \sigma_v > 0$). Selon la méthode Houy (NF P 94-282), $\Delta \sigma_v$ sera calculée en trois zones :

- Zone 1 (entre le niveau inférieur et z_1) : $\Delta \sigma_v = 0$
- Zone 2 (entre z_1 et z_2) : $\Delta \sigma_v$ interpolée entre les zones 1 et 2.
- Zone 3 (au-delà de z_2) : $\Delta \sigma_v = \gamma' H$

$$\text{avec } \theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$$

Les niveaux z_1 et z_2 sont calculés géométriquement en fonction de la position et de la géométrie du remblai. La méthode Houy est bâtie pour un sol monocouche, mais elle est adaptée pour une multicouche.



2.3.3. Risberme

La risberme ne peut être définie que sur le côté excavation de l'écran principal (à gauche).

Selon la méthode proposée dans la norme NF P 94-262 ("Méthode de la banquette"), la butée disponible est limitée, du niveau supérieur au niveau inférieur de la risberme, à la résistance au cisaillement (B_{max}) à chaque niveau de la risberme. Implicitement, nous considérerons une surface horizontale à chaque niveau de la risberme. Au-delà de la risberme, la butée sera calculée conformément au §22.3.1 poids de la risberme.

$$B_{max} = \frac{1}{2} k_{py} \gamma H^2 + k_{pc} c H \leq W \cdot \tan(\varphi) + c \cdot L_r$$

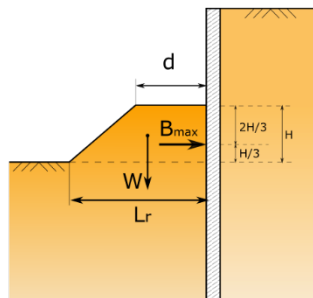


Figure 11. Méthode proposée dans la norme NF P 94-262 ("Méthode de la banquette")

2.3.4. Sur-excavation

Selon les Eurocodes, une sur-excavation doit être prise en compte lorsque le niveau d'excavation n'est pas contrôlé in situ. Sa valeur doit être limitée à 0,5 m.

2.4. Charges externes

2.4.1. Charge de Caquot

La charge de Caquot est une charge semi-infinie (q) appliquée sur un côté de l'écran au niveau z_0 . Son effet est une augmentation de la contrainte verticale sur le sol au-delà du niveau z_0 .

$$\Delta\sigma_v(z) = q \quad \text{pour } z \leq z_0$$

2.4.2. Charge Boussinesq

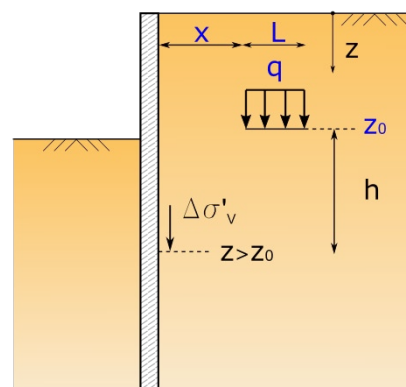
La charge Boussinesq est une charge verticale localisée appliquée au niveau z_0 sur une largeur L à une distance x de l'écran. Son effet est assimilé à une augmentation de la contrainte horizontale à chaque niveau au-delà du niveau z_0 . L'expression suivante a été obtenue pour un sol semi-infini et homogène.

$$\Delta\sigma_v = \frac{\alpha_e q}{0.5 \pi} \left(\arctan\left(\frac{hL}{x(x+L) + h^2}\right) + \frac{xh}{x^2 + h^2} - \frac{(x+L)h}{(x+L)^2 + h^2} \right)$$

$$\text{avec } h = z - z_0$$

Un facteur d'amplification doit être pris en compte pour prendre en compte l'"effet miroir" induit par l'écran. Sa valeur peut être estimée par l'expression suivante :

$$\alpha_e \approx \frac{x+2}{x+1}$$



2.4.3. Charges linéaires et réparties

Les composantes horizontales des charges linéaires et distribuées seront ajoutées systématiquement à l'équilibre horizontal de l'écran. Évidemment, elles influenceront le moment fléchissant, l'effort tranchant et l'effort normal ainsi que les déplacements horizontaux.

Les composantes verticales des charges linéaires et distribuées ne seront prises en compte que pour l'équilibre vertical.

2.4.4. Charge des vagues (méthode Sainflou, PIANC)

La méthode Sainflou pour les vagues stationnaires entièrement réfléchies a été intégrée dans Prosheets. Cette méthode est basée sur le rapport MarCom/WG 28 -2003 de PIANC). Un assistant est disponible avec les données d'entrée suivantes :

| Catégorie / Propriété | | Metric (SI) | Impérial | Description |
|-----------------------|--------------|-------------|----------|--|
| Géométrie | | | | |
| Niveau supérieur | Z_{Top} | m | piéd | Niveau supérieur de l'écran |
| Niveau d'eau (aval) | $Z_{w,aval}$ | m | piéd | Niveau d'eau à l'aval de l'écran |
| Niveau du fond marin | Z_{Seabed} | m | piéd | Niveau du fond marin à l'aval de l'écran |
| Vagues | | | | |
| Période | T | s | s | Période de la vague |
| Hauteur | H | m | piéd | Hauteur des vagues |
| Angle d'incidence | θ | ° | ° | Angle d'incidence de l'onde |

Valeurs calculées :

- | | | |
|--|--|-------------------------|
| • Profondeur de l'eau à l'aval de l'écran : | $d = z_{w,w,front} - z_{Fonds\ marins}$ | m, ft |
| • Longueur d'onde : | $L = \frac{gT^2}{2\pi} \sqrt{\tanh\left(\frac{4\pi^2 d}{T^2 g}\right)}$ | m, ft |
| • Incrément du niveau de l'eau | $\delta_0 = \pi H^2 \coth(2\pi h_s / L) / L$ | m, ft |
| • Influence d'une onde oblique incidente : | $\alpha = 0.50(1 + \cos\theta)$ | ° |
| • Pression d'eau supplémentaire due à l'action de la vague : | $P_1 = \alpha \frac{(P_2 + \gamma_w h_s)(H + \delta_0)}{(H + \delta_0 + h_s)}$ | kN/m ² , ksf |
| • Augmentation de la pression au niveau du fond marin : | $P_2 = \alpha \frac{\gamma_w H}{\cosh\left(\frac{2\pi h_s}{L}\right)}$ | kN/m ² , ksf |
| • Pression d'eau supplémentaire due à l'action de la vague : | $P_3 = \alpha \gamma_w (H - \delta_0)$ | kN/m ² , ksf |

Chaque diagramme de pression est appliqué séparément.

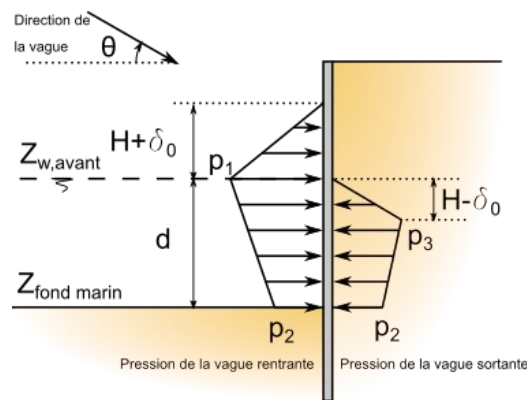


Figure 12. Distribution de la pression vague (méthode Sainflou, PIANC)

2.5. Séisme

2.5.1. Approche Mononobé-Okabé (1924)

Conformément à l'Eurocode 8, l'approche pseudo-statique Mononobé-Okabé (1924) est intégrée dans Prosheets, il consiste à :

- Réévaluer les pressions actives (p_a) et passives (p_b) du sol de chaque côté de l'écran en tenant compte des forces d'inertie dans le sol.
- Réévaluer la pression d'eau en tenant compte des effets hydrodynamiques uniquement lorsque le sol est défini comme "ouvert" en situation sismique ou lorsqu'il n'y a pas de sol mais seulement de l'eau.
- Tenir compte des forces d'inertie de l'écran $F_H = k_H \times W_{\text{écran}}$ par rapport au poids de l'écran W_{wall} . L'utilisateur pourra choisir de considérer ou non cette force inertielle (non prise en compte par défaut).

Valeurs d'entrée (Eurocode 8 - §7.3.2.2.2) :

- k_H Coefficient sismique horizontal
- k_V Coefficient sismique vertical

Quatre combinaisons sont automatiquement examinées :

- $+k_H, +k_V$
- $+k_H, -k_V$
- $-k_H, +k_V$
- $-k_H, -k_V$

2.5.1.1. Types de comportement du sol dans des conditions sismiques

Selon l'Eurocode 8 - Partie 5, trois types ou modes de comportement du sol existent en situation sismique : sol sec, sol "ouvert" et sol "fermé". Le tableau suivant montre les paramètres à prendre en compte pour chaque type de sol :

| EN 1998-5 Annexe E § | Étui | Type de comportement | Poids du sol | $\tan\theta$ |
|----------------------------|---|-------------------------|--------------------------------|--|
| E.5 | nappe phréatique sous l'écran de soutènement | Sec | $\gamma^* = \gamma$ | $\frac{k_h}{1 \pm k_v}$ |
| E.6 | Sol impérieux et dynamique sous la nappe phréatique | Fermé | $\gamma^* = \gamma - \gamma_w$ | $\frac{\gamma}{\gamma - \gamma_w} \cdot \frac{k_h}{1 \pm k_v}$ |
| E.7 | Sol dynamique (très) perméable sous la nappe phréatique | Ouvert | $\gamma^* = \gamma - \gamma_w$ | $\frac{\gamma_d}{\gamma - \gamma_w} \cdot \frac{k_h}{1 \pm k_v}$ |

Où :

- θ Obliquité sismique équivalente (Eurocode 8 - Annexe E - §E.5, E.6 et E.7)
- γ^* Poids unitaire du sol
- γ Poids unitaire saturé du sol
- γ_d Poids unitaire sec du sol (non immergé)
- γ_w Poids unitaire de l'eau

2.5.1.2. Modification de la poussée limite (Eurocode 8 - Annexe E - §E.4)

L'effet sismique implique une réduction de la résistance au cisaillement disponible, de manière à obtenir une augmentation de la poussée limite.

L'augmentation de la poussée est évaluée comme la différence entre l'effet des conditions sismiques définies par l'utilisateur et les conditions sismiques nulles. Ensuite, cet incrément dynamique de poussée limite est ajouté à la poussée limite statique.

Les expressions suivantes fournissent la valeur de $k_{a,d}$. Elles sont valables tant que $\phi'_d > \theta$.

- Si $\beta \leq \phi'_d - \theta$:

$$K = \frac{\sin^2(\psi + \phi'_d - \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\psi - \theta - \delta_d) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi'_d + \delta_d) \sin(\phi'_d - \beta - \theta)}{\sin(\psi - \theta - \delta_d) \sin(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

- Si $\beta > \phi'_d - \theta$:

$$K = \frac{\sin^2(\psi + \phi - \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\psi - \theta - \delta_d)}$$

2.5.1.3. Modification de la butée limite (Eurocode 7 - Annexe E - §E.4)

L'effet sismique implique une réduction de la résistance au cisaillement disponible, donc une réduction de la butée limite. L'expression suivante fournit la valeur de $k_{p,d}$. Elle est valable tant que $\phi'_d > \theta$.

$$K = \frac{\sin^2(\psi + \phi'_d - \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\psi + \theta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin \phi'_d \sin(\phi'_d + \beta - \theta)}{\sin(\psi + \beta) \sin(\psi + \theta)}} \right]^2}$$

L'augmentation de la butée limite est évaluée comme la différence entre l'effet des conditions sismiques définies par l'utilisateur et les conditions sismiques nulles. Ensuite, cet incrément dynamique est ajouté à la butée limite en statique.

2.5.1.4. Effet de la cohésion

L'effet de la cohésion sera évalué à l'aide des expressions suivantes :

$$k_{acd} = -2c\sqrt{k_{ayd}} \quad \text{et} \quad k_{pcd} = 2c\sqrt{k_{pyd}}$$

k_{ayd} et k_{pyd} sont évalués à l'aide des expressions indiquées aux §2.5.1.2 et §2.5.1.3.

2.5.1.5. Effets hydrodynamiques (modèle Westergaard)

Les effets hydrodynamiques sont pris en compte lorsque l'eau est considérée comme "libre" (lorsque le sol est considéré comme "ouvert"/"très perméable" ou en l'absence de sol). Cet effet ne sera pris en compte que pour l'écran principal.

Il y a 2 cases à cocher (seulement disponible pour l'écran principal en cas de projet à double écran) :

- ✓ Effets hydrodynamiques sur le côté gauche (sélectionné par défaut)
- ✓ Effets hydrodynamiques sur le côté droit (non sélectionné par défaut, uniquement si le sol est très perméable)

En conditions sismiques, la pression statique de l'eau n'augmente que lorsque l'eau est considérée comme libre :

$$u_w \Big|_{\text{static+dynamic}} = u_w \Big|_{\text{static}} \pm \Delta u_{wd} \quad \text{avec} \quad \Delta u_{wd}(z) = \frac{7}{8} k_H \gamma_w \sqrt{hz}$$

Où : z Distance entre le niveau d'eau et le niveau de calcul

H Hauteur d'eau sur tous les sols ouverts concomitants en contact les uns avec les autres.

Pour chaque couche de sol "ouverte" (i), h sera déduit avec l'expression suivante : $h = h_{\text{ref,haut}}^i - h_{\text{ref,bas}}^i$

$h_{\text{ref,haut}}^i$ Niveau maximal entre la première couche de sol du groupe des couches de sol "ouvertes" et la nappe phréatique (valeur d'entrée)

$h_{\text{ref,bas}}^i$ Niveau inférieur de la dernière couche de sol du groupe des couches de sol "ouvertes" (valeur d'entrée)

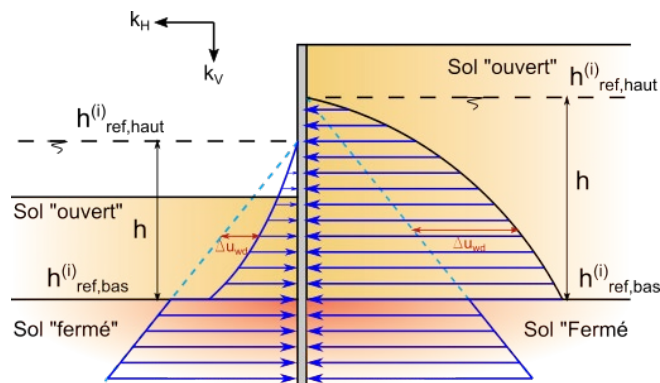


Figure 13. Modèle Westergaard

2.5.2. Approche de Lancellotta (2002)

L'approche de Lancellotta (2002) est également intégré dans Prosheets. Il est fondé sur la réévaluation des coefficients des pression limite de butée avec les formules suivantes. Le coefficient de pression sismique active de la terre est tiré de la formule de Mononobe-Okabé.

Obliquité :

$$\theta = \tan^{-1} \frac{k_h}{1 \pm k_v}$$

Pente du sol :

$$\varepsilon^* = \varepsilon - \theta$$

Poids du sol :

$$\gamma^* = \gamma \sqrt{(1 \pm k_v)^2 + k_h^2}$$

Coefficient de butée en sismique :

$$K_{PE} = \left[\frac{\cos \delta}{\cos(\varepsilon - \theta) - \sqrt{\sin^2 \phi - \sin^2(\varepsilon - \theta)}} \cdot \left(\cos \delta + \sqrt{\sin^2 \phi - \sin^2 \delta} \right) \right] e^{2\theta \tan \phi}$$

Où :

$$2\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \delta}{\sin \phi} \right) + \sin^{-1} \left[\frac{\sin(\varepsilon - \theta)}{\sin \phi} \right] + \delta + (\varepsilon - \theta) + 2\theta$$

2.6. Vérification de la stabilité du bloc d'ancrage (Kranz)

2.6.1. Méthode de calcul

Les écrans appuyés simples et le contre-écran utilisent la résistance du bloc de sol pour stabiliser le système.

La stabilité du bloc de sol doit être vérifiée sous l'action de l'ancrage.

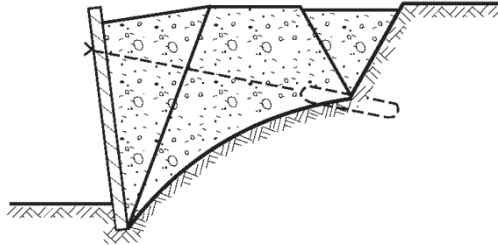


Figure 14. Bloc d'ancrage défailant

La méthode Kranz est actuellement utilisée et proposée par la norme française Eurocode 7 (NF P 94-282). L'objectif est de calculer la réaction maximale de l'ancrage : T pour laquelle l'état limite est atteint. Ensuite, la réaction effective de l'ancrage est comparée à la valeur maximale. Selon les Eurocodes, la valeur de réaction effective de l'ancrage (effort nécessaire pour assurer l'équilibre de l'écran) doit être augmentée et la valeur de résistance (réaction d'ancrage maximale pour laquelle l'état limite est atteint) doit être réduite pour obtenir les valeurs nominales. Enfin, le facteur de sécurité est déduit de la comparaison des valeurs de conception.

Le sol du bloc est défini par un polygone ABCD :

- **A** : niveau supérieur de l'écran ou niveau supérieur du sol naturel.
- **D** : niveau où le cisaillement est nul.
- **C** : point d'ancrage effectif de l'ancrage.
- **B** : projection verticale du point C.

Charges externes appliquées sur le bloc de sol :

- T_u Réaction de l'ancrage
- P_1 Réaction de l'écran, égale à la pression du sol du [AD].
- P_2 Pression de poussée du sol appliquée à l'arrière de [BC].
- W Poids du block
- F_e Somme des charges externes permanentes/variables appliquées sur le bloc
- R_c Résistance au cisaillement disponible générée par la contribution de cohésion sur [CD].
- R_f Résistance au cisaillement disponible générée par la contribution de friction sur [CD].

Pour calculer la force T (réaction d'ancrage maximale pour laquelle l'état limite est atteint), nous considérons l'équilibre des charges horizontales et verticales.

$$\vec{R}_c + \vec{R}_f + \vec{W} + \vec{F}_e + \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{T} = \vec{0}$$

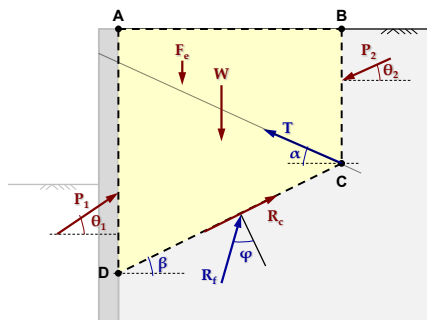


Figure 15. Équilibre de tous les efforts appliqués sur le bloc d'ancrage (Kranz)

2.6.2. Prise en compte des conditions sismiques

Afin de tenir compte des conditions sismiques dans l'analyse de la stabilité du bloc de sol, on peut inclure les forces inertielles dans l'équilibre des blocs de sol, en particulier :

- Augmentation de la poussée limite du sol à l'arrière de [BC].
- Force d'inertie verticale en fonction du poids du bloc de sol
- Force d'inertie horizontale en fonction du poids du bloc de sol

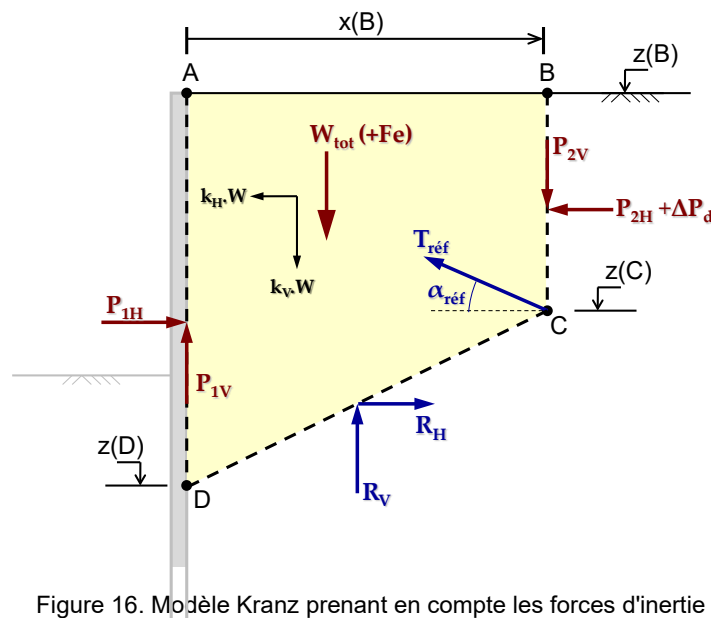


Figure 16. Modèle Kranz prenant en compte les forces d'inertie

Évidemment, la résolution d'équilibre montre clairement l'effet négatif du séisme sur la stabilité du bloc d'ancrage. Par conséquent, le facteur de sécurité sera plus faible qu'en situation statique.

Valeurs absolues de k_H et k_V sont considérées comme des données d'entrée du calcul. Quatre combinaisons sont calculées automatiquement :

- $+k_H, +k_V$
- $+k_H, -k_V$
- $-k_H, +k_V$
- $-k_H, -k_V$

2.6.3. Contre-écran

Le modèle Kranz a été adapté pour les projets de contre-écran :

- Géométrie : l'écran d'ancrage sera considéré comme le bord arrière du bloc de sol et le point C est défini par le niveau inférieur de l'écran d'ancrage.
- La pression de poussée à l'arrière (P2) est considérée comme la somme de toutes les charges externes appliquées à l'arrière du contre-écran et de la pression différentielle de l'eau :

$$\vec{P}_2 = \vec{P}_{2,\text{sol}} + \vec{P}_{\text{w,diff}}$$

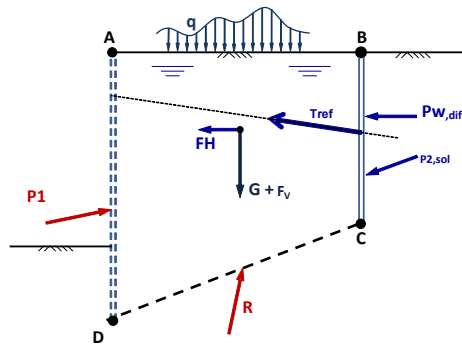


Figure 17. Coffret de système d'ancrage mural (Kranz)

2.7. Vérification de l'équilibre vertical

Le contrôle de l'équilibre vertical consiste à évaluer la direction de la force verticale résultante appliquée sur l'écran, égale à la somme de toutes les charges des composantes verticales appliquées sur l'écran. De plus, ce contrôle permet de valider l'inclinaison des pressions limites du sol.

Pour les écrans en autostable, l'inclinaison de la contre-pression passive du sol est modifiable par l'utilisateur dans les paramètres du sol pour adapter sa valeur et satisfaire l'équilibre vertical.

La direction verticale de la force résultante peut être :

- Vers le haut : dans ce cas, l'inclinaison de la pression terrestre active et passive doit être corrigée.
- Vers le bas : dans ce cas, la valeur atteinte peut être utilisée pour vérifier la capacité portante du sol.

La valeur de la force verticale résultante sera calculée à partir de l'expression générale suivante :

$$\mathbf{R}\mathbf{v}_d = \mathbf{P}_d + \mathbf{P}\mathbf{v}_d + \mathbf{F}\mathbf{v}_d + \mathbf{T}\mathbf{v}_d$$

Où :

| | |
|--------|--|
| P_d | Poids total de l'écran |
| Pv_d | La valeur de calcul des pressions résultantes sur les terres |
| Fv_d | La valeur de calcul des charges externes qui sont appliquées sur l'écran |
| Tv_d | Valeur de calcul de la réaction d'ancrage résultante |

