

UTILISATION DU CALCUL À LA RUPTURE POUR L'ESTIMATION DES PRESSIONS DES TERRES SUR LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

YIELD DESIGN BASED APPROACH FOR THE CALCULATION OF ACTIVE AND PASSIVE SOIL PRESSURES ON RETAINING STRUCTURES

Youssef Abboud¹, Marc Huerta¹, Fahd Cuiria¹, Sébastien Burlon¹

¹ Terrasol (SETEC), Paris, France

RÉSUMÉ – Cet article présente une mise en œuvre pratique de la méthode cinématique du calcul à la rupture pour calculer les pressions limites de poussée et de butée. Cette méthode est utile pour des cas de figure pour lesquels les formulations actuelles ne sont pas directement applicables. L'article propose des recommandations pratiques pour le calcul et l'intégration des diagrammes obtenus dans la justification des ouvrages de soutènement.

ABSTRACT – This paper presents a yield analysis based approach for the calculation of soil active and passive pressures. This approach is useful for design cases where current methods cannot be directly used. The paper proposes useful recommendations for the use of the calculated soil pressures diagrams in the design of retaining structures.

1. Calcul de la poussée et butée à partir de l'approche cinématique du calcul à la rupture

La justification des ouvrages de soutènements nécessite le calcul préalable des pressions limites de poussée et de butée mobilisées de part et d'autre de l'écran. Dans le cadre des formulations analytiques disponibles dans la littérature, ces pressions sont calculées point par point. En chaque point du parement, la pression limite de poussée ou de butée est calculée en fonction de la contrainte verticale effective σ'_v comme suit (en absence de cohésion) :

$$p_a = K_a \times \sigma'_v \quad \text{et} \quad p_b = K_p \times \sigma'_v \quad (1)$$

Où K_a et K_p sont respectivement les coefficients de poussée et de butée. Ils sont calculés en fonction de l'angle de frottement du sol, du fruit du parement, de la pente du terrain et de l'inclinaison de la pression par rapport au parement (Kerisel et Absi, 1990, Burlon, 2023).

Les effets du poids des terres, de la pression interstitielle, de la cohésion ainsi que de l'effet additionnel des surcharges sur le terrain sont cumulés. Néanmoins, ces formulations sont restreintes par leur construction aux cas de figure simples : terrain naturel horizontal ou de pente infinie, toit horizontal des couches, conditions hydrauliques idéalisées (hydrostatiques par exemple), surcharges infinies d'amplitude non variable ou sol non renforcé. Pour les cas de figures plus avancés, des hypothèses simplificatrices sont généralement considérées, ce qui peut conduire à des résultats approximatifs.

Une méthode mettant en œuvre l'approche cinématique du calcul à la rupture (Salençon, 1983) est proposée dans cet article. Cette méthode s'inscrit dans la continuité de travaux précédents (Simon, 2006, Cuiria et Simon, 2016). Dans le cadre de cette méthode, les pressions des terres sur un écran de soutènement sont définies sous la forme d'un diagramme de pressions appliqué sur le parement, et calculé pour satisfaire un état d'équilibre limite. La résultante de ce diagramme de pressions sera égale à la résultante de la poussée ou de la butée.

Ainsi, le diagramme de poussée est calculé comme étant le chargement minimal nécessaire pour ramener un massif de sol a priori instable à un état d'équilibre limite.

Le diagramme de butée est calculé comme étant le chargement maximal qu'un massif de sol initialement stable peut supporter avant d'atteindre un état d'équilibre limite. (Figure 1).

Le chargement maximal relatif à la poussée (resp. butée) est calculé à partir de l'exploration d'un éventail de mécanismes de rupture associés à une cinématique de poussée (resp. butée).

Ces mécanismes sont définis par des surface de ruptures en arcs de spirales logarithmiques. Chaque surface est définie par deux extrémités : une extrémité sur le profil du terrain naturel (l'étendue de la zone d'exploration et la discrétisation est prédéfinie) et une autre extrémité sur l'intervalle de recherche (à la base du diagramme de poussée/butée à calculer). La courbure de la surface dépend de l'angle de frottement de la couche de sol qu'elle traverse, et d'un angle au centre prédéfini.

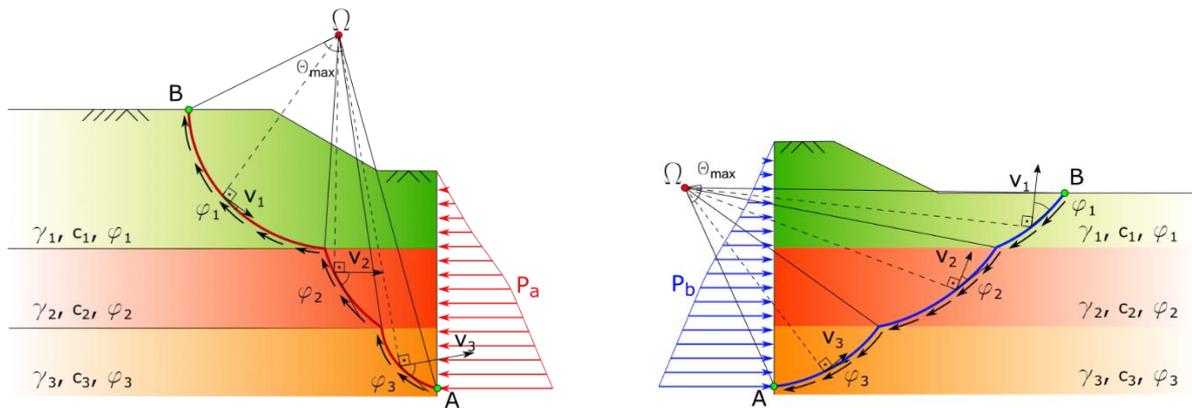


Figure 1. Cinématiques et mécanismes de rupture en poussée (à gauche) et butée (à droite) d'un sol multicouche

L'avantage de cette méthode réside dans sa capacité à traiter des cas de figure pour lesquels les formulations actuelles ne sont pas applicables (terrain naturel variable ou stratigraphie très hétérogène, une ou plusieurs surcharges localisées, conditions hydrauliques en présence d'écoulement, sol renforcé). Ce large éventail d'applications possibles repose sur le fait que les pressions de poussée/butée sont calculées sous forme de forces appliquées au parement, sans aucune contrainte sur les autres éléments du calcul (nature du sol, géométrie, configuration des charges, conditions hydrauliques ou sismiques, présence de renforcements).

Cet avantage sera mis en évidence à travers 4 applications, présentées aux paragraphes 3 à 6.

2. Vérification à partir de cas élémentaires

On propose dans un premier lieu de vérifier l'approche proposée au §1 sur un cas élémentaire pour un sol de poids volumique 20 kN/m^3 avec différentes valeurs de cohésion et d'angle de frottement. Pour chaque cas, la résultante de poussée et de butée calculée pour un parement de hauteur 10 m est comparée à la résultante calculée selon les tables de Kerisel et Absi et le principe des états correspondants.

La méthode proposée relevant d'une approche cinématique par l'extérieur tend, comme attendu, à donner une estimation par défaut (resp. par excès) de la poussée (resp. de la butée). La comparaison montre un bon accord entre les deux méthodes (Tableau 1). Les écarts sont en moyenne 1% et restent globalement inférieurs à 5%, ce qui permet d'utiliser la méthode développée sur des cas plus complexes.

Tableau 1. Vérification de l'approche proposée à partir de cas élémentaires

γ	c	φ	Résultante en poussée			Résultante en butée				
			δ/φ	Kerisel et Absi	Calcul à la rupture	Écart	δ/φ	Kerisel et Absi	Calcul à la rupture	Écart
kN/m^3	kPa	°		kN	kN	%	-	kN	kN	%
20	0	20	0	490	489	0.2%	0	2050	2056	0.3%
20	0	20	+2/3	442	440	0.5%	-2/3	2750	2761	0.4%
20	0	30	0	333	331	0.8%	0	3000	3029	1.0%
20	0	30	+2/3	300	300	0.0%	-2/3	5300	5386	1.6%
20	0	40	0	217	217	0.0%	0	4600	4601	0.0%
20	0	40	+2/3	202	199	1.5%	-2/3	12000	12537	4.5%
20	10	35	0	167	164	1.9%	0	4074	4104	0.7%
20	10	35	+2/3	127	120	5.4%	-2/3	8627	8777	1.7%
20	50	0	0	0	0	0.0%	0	2000	2016	0.8%

3. Application 1 : Poussée d'un sol hétérogène

Cette application concerne le calcul du diagramme de poussée d'un sol hétérogène, avec des couches présentant un pendage et une couche intermédiaire qui n'est pas en contact avec l'ouvrage de soutènement étudié.

Dans le cadre des formulations analytiques disponibles dans la littérature, le diagramme de poussée est calculé en considérant seulement la stratigraphie le long du parement. Par conséquent, les toits non horizontaux et la présence de couches intermédiaires derrière le parement ne peuvent pas être considérés. Cela peut conduire à une estimation erronée de la poussée.

On propose de calculer la poussée en utilisant l'approche proposée au §1. Le calcul est fait sur deux cas différents :

- Cas 1 : un modèle où la couche intermédiaire a des meilleures propriétés de cisaillement que les couches adjacentes au parement ;
- Cas 2 : un modèle où, à l'inverse, la couche intermédiaire a des propriétés de cisaillement moins bonnes que les couches adjacentes au parement.

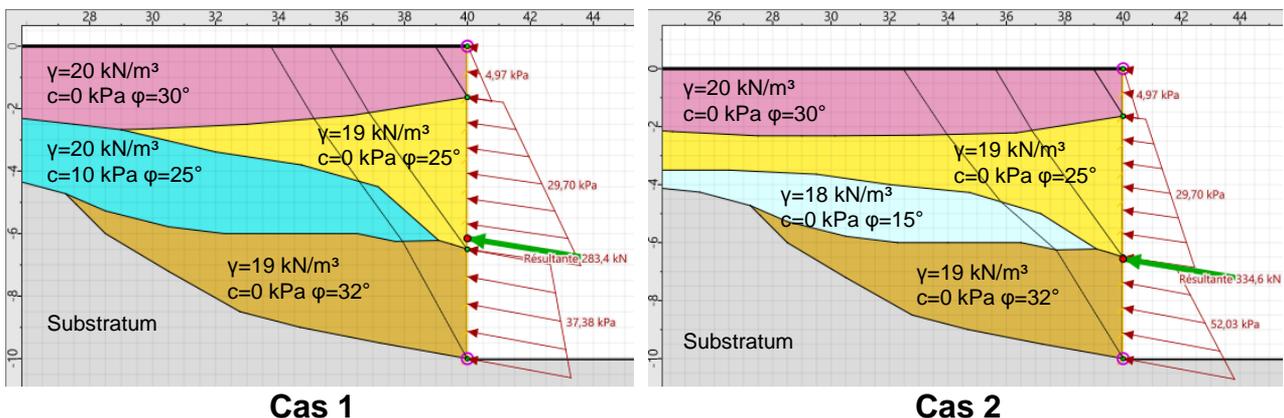


Figure 2. Calcul de la poussée d'un sol hétérogène : cas 1 (à gauche) et cas 2 (à droite)

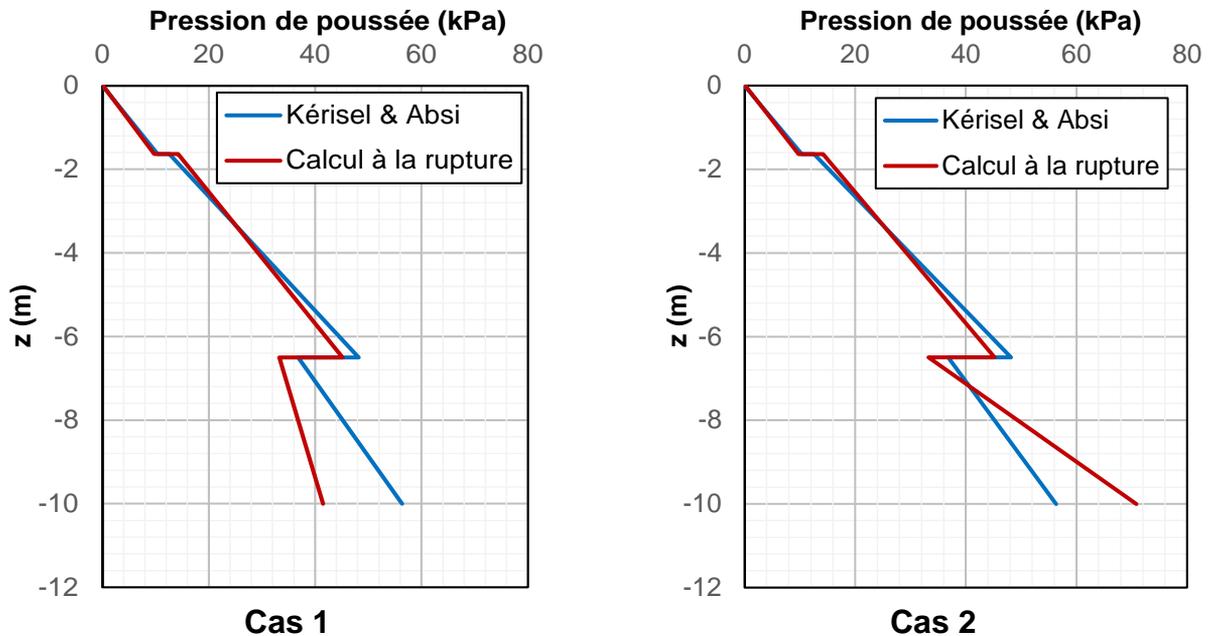


Figure 3. Comparaison du résultat obtenu à l'aide de l'approche proposée au §1 aux formules de Kérisel et Absi : cas 1 (à gauche) et cas 2 (à droite)

La Figure 2 montre une vue des deux modèles et la Figure 3 permet de confronter les résultats obtenus à l'aide de l'approche proposée au §1 aux résultats obtenus en appliquant les formules de Kerisel et Absi (sans prise en compte de l'hétérogénéité des terrains).

On peut constater que la pression de poussée calculée à l'aide de la méthode cinématique du calcul à la rupture permet une représentation a priori plus réaliste de la réalité : pour le cas 1, le calcul tient compte de la présence de la couche intermédiaire plus résistante, ce qui conduit à une poussée globalement moins élevée, alors que pour le cas 2, le calcul tient compte de la présence de la poche moins résistante, ce qui conduit à une pression de poussée plus élevée.

4. Application 2 : Poussée induite par une surcharge localisée

Cette application concerne la poussée induite par une surcharge non infinie sur un terrain variable. Les formulations analytiques disponibles dans la littérature permettent de calculer la pression de poussée due à une surcharge infinie « q », par :

$$p_q = K_{aq} \times q \quad (2)$$

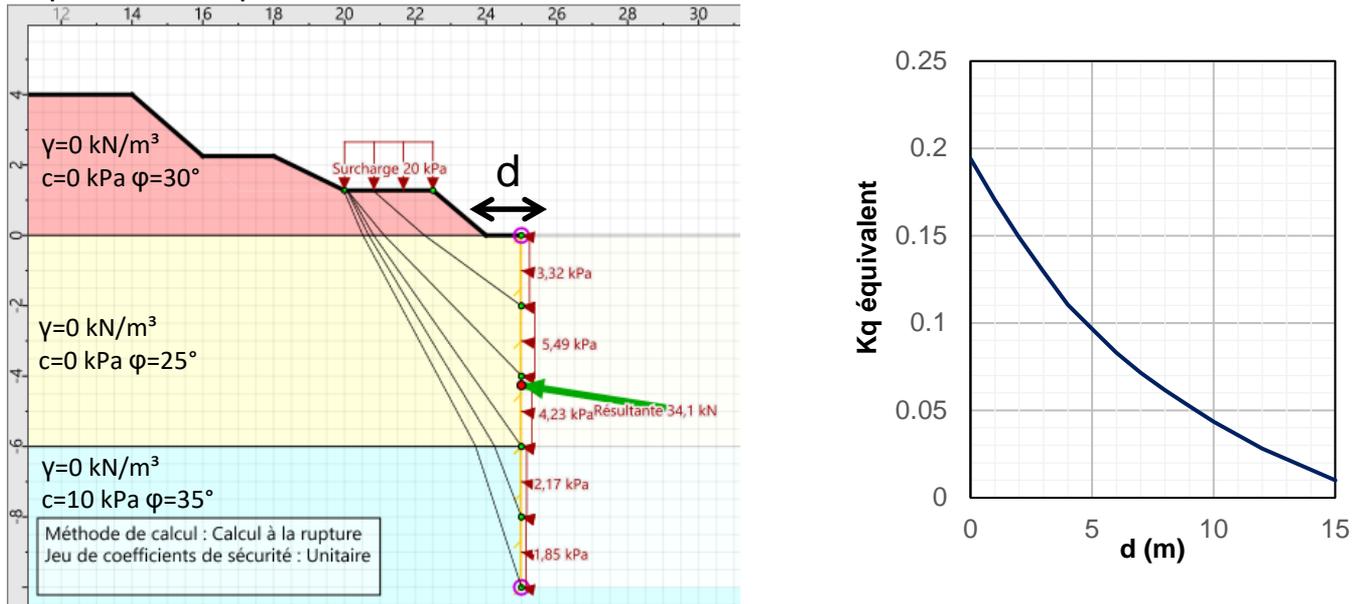
Où K_{aq} est le coefficient de poussée relatif aux surcharges, calculé en fonction de l'angle de frottement du sol.

Pour les surcharges localisées, des modèles de diffusion des contraintes dans un milieu continu sont utilisés (solutions de Boussinesq, de Graux, par exemple). L'application de ces modèles est limitée de par leur construction aux cas de sol homogènes (ou à faibles contrastes d'angles de frottements).

On propose de calculer la poussée due à une surcharge non infinie de 20 kPa appliquée sur un sol multicouche à toit variable, en utilisant l'approche proposée au §1. La poussée est calculée sur un ouvrage de soutènement situé à une distance d du remblai sur lequel est appliquée la surcharge. Le but étant d'explorer l'évolution de la poussée en fonction de d. Pour chaque valeur de d, un coefficient de poussée équivalent ($K_{q\text{-équivalent}}$) est calculé comme suit :

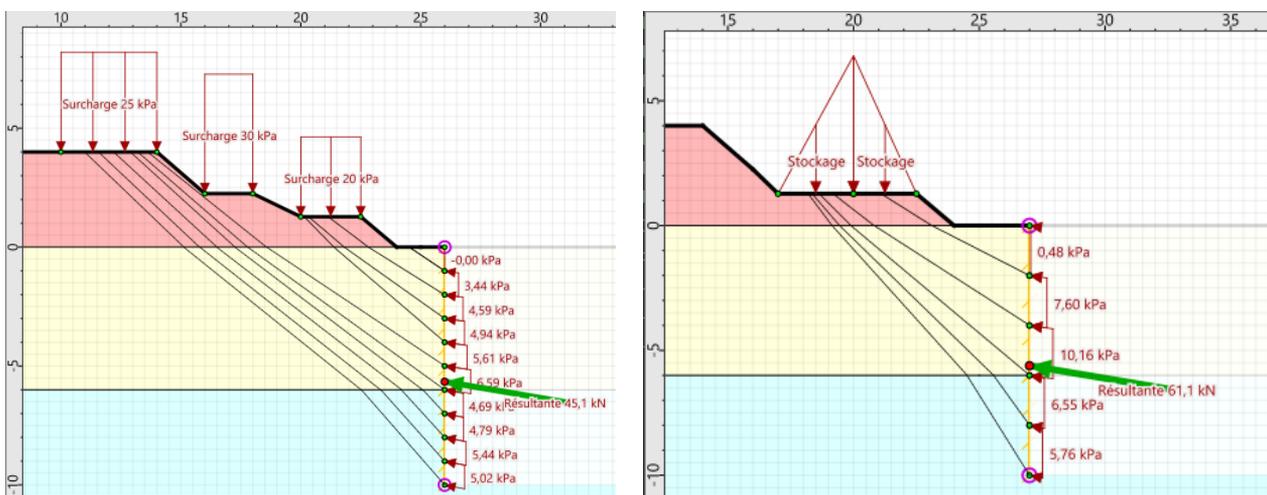
$$K_{q\text{-équivalent}} = P_a / (q \times h) \quad (3)$$

Où P_a est la résultante du diagramme de poussée, q est la densité de la surcharge appliquée (ici 20 kPa) et h est la hauteur du parement de l'ouvrage de soutènement (ici 10 m). À noter que pour calculer le diagramme de poussée due à la surcharge seule, les poids volumiques des couches de sol sont artificiellement annulés.



Les résultats illustrés sur la Figure 4 montrent que les valeurs de $K_{q\text{-équivalent}}$ décroissent en fonction de d , à partir d'une valeur autour de 0.2 jusqu'à une valeur quasi nulle au-delà de 15 m. Le diagramme calculé permet de capturer l'évolution de la poussée induite par la surcharge en fonction de la profondeur. Ainsi, la profondeur du pic de poussée peut être déterminée avec une exactitude satisfaisante, ce qui aide à fiabiliser le dimensionnement de l'écran. La capacité de la méthode proposée à rendre compte finement de la présence d'une charge ponctuelle est ici pleinement illustrée.

Le même calcul peut être effectué pour plusieurs surcharges localisées, ou pour une charge à densité non uniforme comme une charge de stockage par exemple (Figure 5).



5. Application 3 : Écran de soutènement en présence d'écoulement

Cette application concerne le calcul des pressions de butée sur un écran de soutènement en présence d'un écoulement autour de la fiche de l'écran.

Selon les formalismes conventionnels, la pression limite de poussée ou de butée est calculée en fonction de la contrainte verticale effective σ'_v qui dépend à son tour de la pression d'eau. Usuellement, cette pression d'eau est évaluée en fonction des conditions hydrauliques au niveau du parement sans considérer la distribution des pressions dans le massif (possiblement non identique à celles au niveau du parement). Cela fait que les cas de nappe à toit variable (rabattement de nappe par exemple) ou les situations d'écoulement ne sont pas couvertes.

Dans le cadre de la méthode basée sur le calcul à la rupture (§1), cette limitation n'existe plus. L'équilibre mécanique du système (volume de sol délimité par une surface de rupture bien définie) est étudié en intégrant un maillage de pressions d'eau à tout point du massif. Ce maillage de pressions interstitielles peut être entre autres généré à partir d'un calcul d'écoulement dans lequel sont considérées les perméabilités horizontale et verticale de chaque couche de sol et des potentiels hydrauliques imposés.

Cette application permet de constater l'influence de l'écoulement dans le calage de la butée en présence d'un écoulement par rapport à l'hypothèse simplificatrice d'une distribution hydrostatique de pressions d'eau (hypothèse qui peut s'avérer non adaptée). Dans le cas examiné par exemple, la pression de butée diminue d'environ 15% (Figure 6).

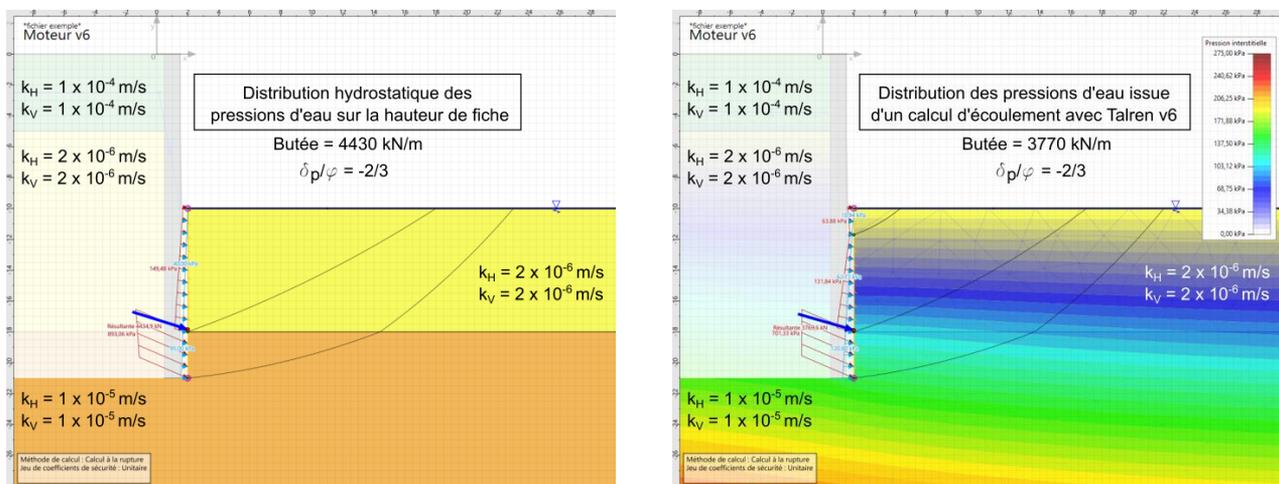


Figure 6 Comparaison de la valeur de la butée sur la hauteur de fiche d'un écran de soutènement en présence d'un écoulement autour de sa fiche

6. Application 4 : Butée sismique d'un massif renforcé par inclusions rigides

Cette application concerne le calcul de la pression de butée du massif renforcé par un maillage d'inclusions rigides.

Les formulations analytiques disponibles dans la littérature permettent de calculer la pression de butée sans renforcements. Pour tenir compte de l'effet bénéfique des inclusions, deux alternatives sont possibles :

- la présence des inclusions est considérée de manière qualitative : leur effet sur la butée est traduit comme une marge de sécurité sans la quantifier. Cela pourrait conduire à une sous-estimation de ces effets ;
- le comportement est étudié par une modélisation avancée (de type éléments finis). Cela pourrait accroître le coût des études.

On propose donc de calculer la butée en utilisant l'approche proposée au §1 avec et sans inclusions, avec et sans séisme et en considérant une inclinaison variable de la butée par

rapport au parement. Le but étant de quantifier l'effet bénéfique des inclusions sur la butée. Le massif étudié ainsi que le modèle de calcul (en vert) sont montrés sur la Figure 7.

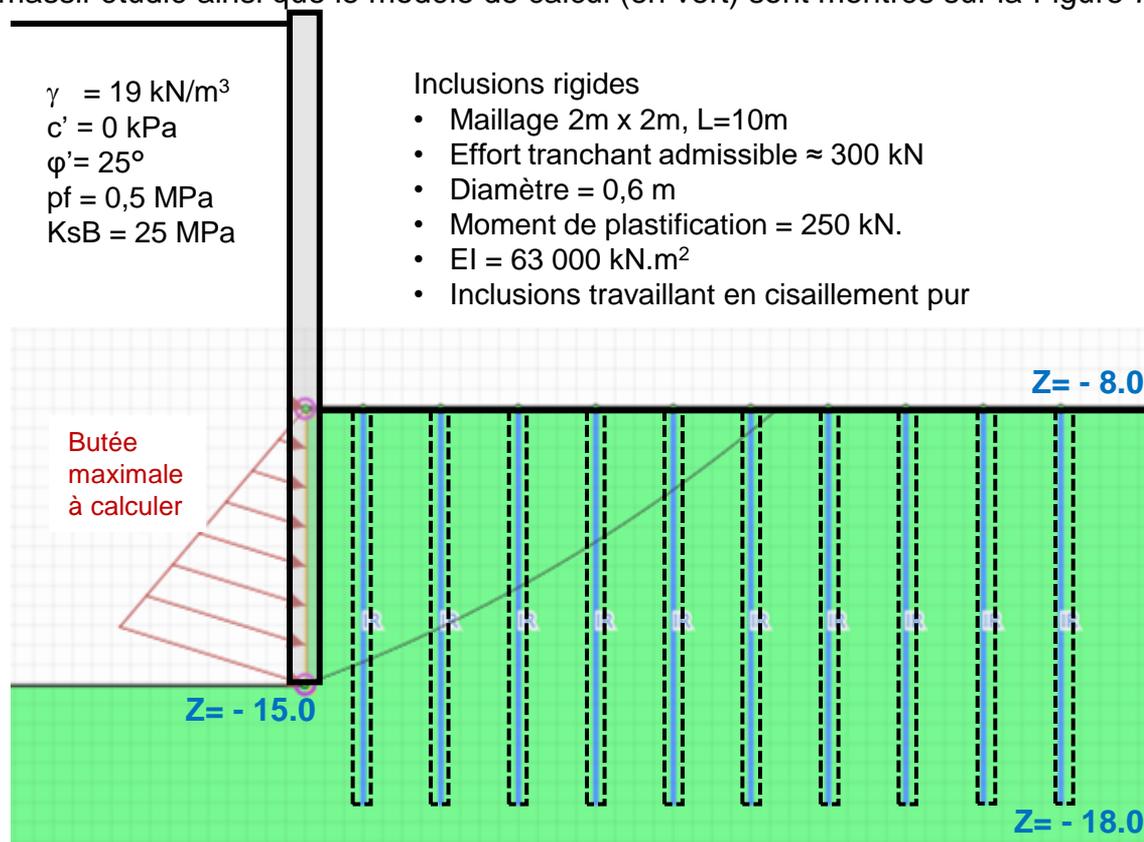


Figure 7. Modélisation d'un massif renforcé par inclusions rigides pour le calcul de la butée limite en tenant compte de la présence des inclusions

Le tableau suivant récapitule les résultantes de butée obtenues pour chaque cas examiné, ainsi que le coefficient de butée équivalent et le rapport de butée (avec inclusions / sans inclusions). Ces résultats montrent l'effet bénéfique non négligeable des inclusions sur la pression maximale de butée (dans ce cas, on constate une augmentation de 1.3 à 2 fois).

Tableau 2. Butée avec et sans inclusions rigides

Cas	δ/φ	Séisme	Résultante sans IR	Résultant e avec IR	K_p (sans IR)	K_p (avec IR)	Rapport des K_p
1	0	0	1218	1645	2.49	3.36	1.35
2	-2/3	0	1853	2742	3.78	5.59	1.48
3	0	0.6/0.3	875	1644	1.37	2.58	1.88
4	-2/3	0.6/0.3	1149	2465	1.80	3.87	2.14

Ces résultats peuvent être exploités dans le calcul des écrans de soutènement selon plusieurs méthodes :

- le coefficient de butée K_p avec inclusions rigides (ou le diagramme de butée calculé) peut être introduit dans l'analyse de la stabilité de l'écran de soutènement étudié pour tenir compte de ces effets ;
- l'effet des inclusions peut être traduit par une cohésion équivalente du sol (démarche applicable seulement aux sols homogènes). Cette cohésion peut être calculée à partir de la différence entre les résultantes de butée sans inclusions rigides (P_{b0}) et avec inclusions rigides (P_{b1}).

$$c_{eq} = \frac{P_{b1} - P_{b0}}{h \times K_{pc}} \quad (4)$$

Où c_{eq} est la cohésion équivalente, h est la hauteur du parement et K_{pc} est le coefficient de butée due à la cohésion, calculé en fonction de l'angle de frottement.

7. Apports de l'approche cinématique au calcul des poussées des terres

Dans cet article, une mise en œuvre pratique de la méthode cinématique du calcul à la rupture pour calculer les pressions limites de poussée et de butée a été présentée.

L'avantage de cette méthode est sa capacité à traiter divers cas de figure, puisque la pression de poussée ou de butée est calculée à l'échelle du parement (forces appliquées au parement). Ainsi, aucune limitation sur les autres éléments du calcul (nature du sol, géométrie, configuration des charges, conditions hydrauliques ou sismiques, présence de renforcements) n'est présente.

En plus, le coût de calcul est relativement faible par rapport à des méthodes plus sophistiquées (simulations aux éléments finis par exemple).

Une vérification de la méthode est présentée dans le §2 à travers une comparaison basée sur des cas élémentaires.

Ensuite, le large éventail d'applications possibles de cette méthode est mis en évidence à travers quatre cas de figures pour lesquels l'application des formalismes disponibles dans la littérature nécessite des hypothèses simplificatrices est présentée.

Pour chaque cas, le diagramme de poussée ou butée est calculé. Ces diagrammes peuvent être ensuite utilisés pour alimenter des calculs de dimensionnement des ouvrages étudiés (par exemple un calcul par la méthode du coefficient de réaction, un calcul d'équilibre limite d'un mur de soutènement, etc.).

Ces applications montrent que la méthode cinématique du calcul à la rupture constitue un cadre rigoureux qui permet de développer des approches de calcul utiles pour la pratique de l'ingénierie, complétant et dépassant sur certains points les approches traditionnelles essentiellement basées sur des développements analytiques.

8. Références

- Burlon S. (2023). Un exemple d'intégration numérique des coefficients de poussée et de butée en milieux pesants. *Revue Française de Géotechnique* 2023, 174, 3.
- Cuira F., Simon B. (2016). Apports de la méthode cinématique du calcul à la rupture pour la conception des soutènements. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nancy 2016*
- Salençon J. (1983). *Calcul à la rupture et analyse limite*. Presses de l'ENPC.
- Simon B. (2006). *Applications du calcul à la rupture aux ouvrages de soutènements*. Compte-rendu Symposium international ELU – ULS, LCPC, Paris.
- Kérisel J., Absi E. (1990). *Tables de poussée et de butée des terres*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.