

ANALYSE PROBABILISTE DANS LES CALCULS DE STABILITE DE PENTE : APPLICATION SUR UNE MINE EN FRANCE

PROBABILISTIC ANALYSIS IN SLOPE STABILITY CALCULATIONS: APPLICATION TO A MINE SITE IN FRANCE

Rosy MILANE¹, Sylvie BRETTELLE¹, Eric ANTOINET¹

¹ Antea Group, Antony, France

RÉSUMÉ – Les méthodes probabilistes utilisées dans les analyses de stabilité de pentes permettent non seulement d'obtenir un facteur de sécurité pour un jeu de paramètres sélectionné mais aussi une probabilité de rupture. Cet article présente une application dans le cadre d'un site minier en France. Une analyse statistique des données permet de définir la distribution des caractéristiques mécaniques des différents types de matériaux.

ABSTRACT – Probabilistic methods used in slope stability analyses not only provide a factor of safety for a selected set of parameters, but also a probability of failure. This paper presents an application to a mine site in France. Statistical analysis of the data will be used to define the distribution of mechanical characteristics for different types of material.

1. Introduction

L'analyse de stabilité des pentes est généralement réalisée à l'aide de plusieurs méthodes déterministes qui peuvent être classées en plusieurs catégories : équilibre limite, méthode de l'analyse limite, méthodes numériques que ce soit en différences finies, en éléments finies ou en éléments discrets (Ullah et al., 2020). Ces méthodes sont le plus souvent accompagnées par un certain nombre d'incertitudes liées aux anomalies géologiques, à la variabilité spatiale des propriétés du sol, à la rareté des données, à l'évolution des conditions environnementales, aux mécanismes de rupture des sols, aux simplifications et approximations adoptées dans les modèles géotechniques (El-Ramly et al., 2002). Un glissement de terrain pourra avoir lieu par exemple suite à des venues d'eau ou bien parce que les matériaux rencontrés aux fronts ne correspondent pas à ce qui a été considéré dans le calcul.

Il en résulte que le facteur de sécurité global calculé à l'aide des méthodes déterministes est le plus souvent surestimé, malgré les facteurs partiels définis dans les normes européennes.

En revanche, pour tenir compte de la variabilité de ces paramètres et surtout de la variabilité des caractéristiques mécaniques des sols, les méthodes probabilistes ont été introduites en mécanique des sols (Magnan, 1982) et dans les analyses de stabilité de pentes dans les années 70 (El-Ramly, 2002) par Alonso (1976), Tang et al., (1976) et Harr (1977).

Elles ont ensuite été développées par plusieurs auteurs (Selmi et al., 2006 ; Obregon et Mitri, 2019 ; Abdulai et Sharifwadeh, 2021) avant qu'elles soient, quelques années plus tard, implémentées dans de nombreux logiciels couramment utilisés en géotechnique. De nos jours, les méthodes probabilistes commencent à être de plus en plus utilisées, mais restent en pratique l'exception sur les projets courants.

Elles permettent la quantification des incertitudes des paramètres du sol au travers du calcul des probabilités de défaillance en plus du facteur de sécurité, pour un jeu de paramètres moyens sélectionné.

La méthode probabiliste utilisée dans le cadre de cette étude utilise la méthode de Monte-Carlo qui permet de générer des variables aléatoires pour les paramètres utilisés dans le calcul. L'élément clé de l'analyse probabiliste dans l'étude de stabilité des pentes est la détermination d'une base de données fiable qui regroupe les caractéristiques mécaniques des couches de sol obtenues à partir d'essais in situ ou en laboratoire.

Après un résumé des éléments clés de l'analyse probabiliste dans les calculs de stabilité de pentes, cet article présentera une application dans le cadre de l'étude de stabilité sur un site minier en France. Des essais en laboratoire ont été réalisés sur des matériaux prélevés sur le site. Une analyse statistique de ces données sera décrite ce qui permettra de définir la distribution des caractéristiques mécaniques des différents types de matériaux.

Les hypothèses et les résultats des calculs déterministes et probabilistes réalisés sur différentes zones du site sur la base des critères de stabilité définis par le client seront présentés. Ces calculs montreront l'importance de réaliser des analyses probabilistes dans les calculs de stabilité de pentes dont la rupture peut avoir des conséquences humaines et matérielles très importante.

2. Aléas et incertitudes en géotechnique

Les incertitudes en géotechnique peuvent avoir plusieurs causes. Elles sont appelées incertitudes passives, actives ou erreurs de modèle (Dubost, 2009).

- Les premières sont liées aux mesures et comprennent les erreurs d'observation (erreur de mesure, erreur de représentativité, erreur de l'instant) et les erreurs d'enquête ou d'échantillonnage.
- Les incertitudes actives sont liées à la variabilité naturelle d'une propriété du sol qui peut être due à plusieurs facteurs naturels et qui, par conséquent, permet d'observer une dispersion des valeurs mesurées au sein d'un même site.
- Les erreurs de modèle sont directement liées aux hypothèses retenues dans le calcul.

Afin de pouvoir réduire les incertitudes en géotechnique, il est très important de bien définir les propriétés des sols rencontrés. Dans le cadre de cette étude, nous analyserons uniquement les incertitudes sur les paramètres géotechniques, dans une approche qui permet de réduire ces incertitudes même si les probabilités de rupture dépendent d'autres facteurs.

Cet article permet aussi de proposer des arguments en faveur des analyses probabilistes afin de les proposer de façon plus systématique sur les projets courants.

3. Cas d'étude

3.1. Méthodologie de travail

L'ensemble des calculs de stabilité sera effectué avec le logiciel SLOPE/W avec une discrétisation par tranches et en utilisant la méthode de calcul de Morgenstern et Price (Morgenstern et Price, 1965), qui respecte les conditions d'équilibre en forces et en moments.

SLOPE/W (v 2021.3), le logiciel utilisé dans le cadre de la présente étude, permet à la fois d'effectuer des calculs de stabilité selon les méthodes déterministes et probabilistes. Il calcule le facteur de sécurité, la probabilité de défaillance, définie comme la probabilité que le facteur de sécurité soit inférieur à un, en utilisant une approche de Monte-Carlo qui produit une gamme de valeurs possibles pour représenter la distribution statistique plutôt

qu'une valeur moyenne unique. Dans ce travail, 2000 échantillons de Monte-Carlo ont été utilisés.

La méthode Morgenstern-Price a permis de calculer les facteurs de sécurité.

La variabilité de la perméabilité et du niveau de la nappe phréatique n'ont pas été prises en compte.

Les résultats ont été comparés avec les seuils exigés par le client : un facteur de sécurité déterministe compris entre 1,3 et 1,5 et une probabilité de défaillance inférieure à 5%.

L'étude probabiliste est menée en considérant des distributions normales pour définir les paramètres considérés comme variables dans l'étude (poids volumique, cohésion et angle de frottement pour les horizons représentatifs).

Les lois probabilistes relatives aux matériaux du site ont été définies en relation avec une revue bibliographique, la considération des mesures, et la description des matériaux du site (Guo et al.,2019 ; Siacara et al.,2020 ; Pieczynska,2013).

3.2. Présentation du projet

La présente étude concerne les calculs de stabilité des pentes réalisés dans le cadre d'un projet minier en France, que ce soit lors du stockage de stériles ou durant l'exploitation de matériaux. Pour des raisons de confidentialité, la localisation du projet et la zone d'étude concernée par cet article ne seront pas indiquées. Pour ces mêmes raisons, cet article se concentre sur les arènes granitiques présentées en marron dans la coupe ci-dessous, bien que les calculs aient été réalisés sur les différents matériaux présents sur le site.

La coupe concernée par cet article est présentée dans la figure suivante :

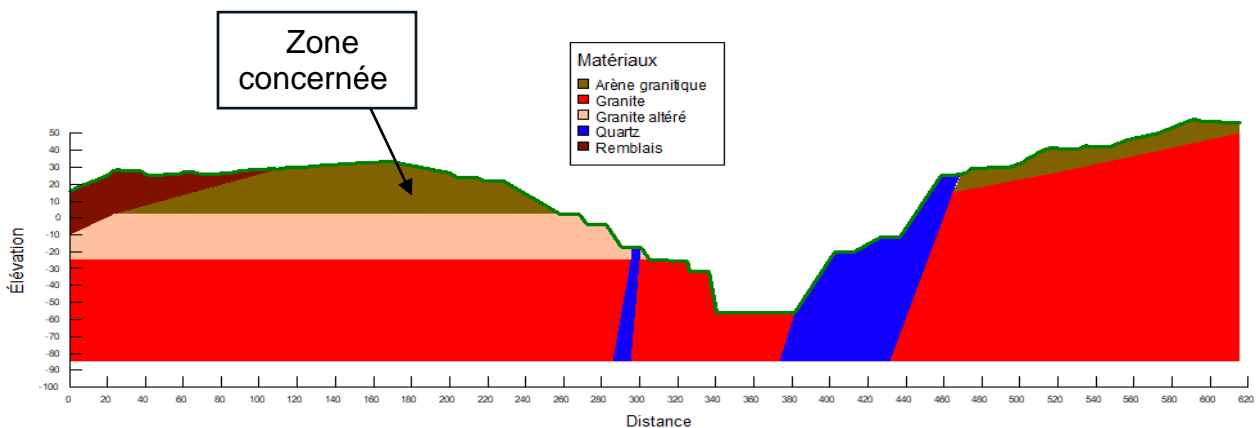


Figure 1. Coupe modélisée sur SLOPE/W

3.3. Définition des paramètres probabilistes sur la base des données historiques

Les arènes granitiques sont caractérisées par un comportement granulaire, un angle de frottement supérieur à 30 degrés, et une cohésion généralement très faible. L'analyse statistique des données des arènes granitiques se base sur 7 essais en laboratoire. Elle est présentée dans les tableaux et figures suivants.

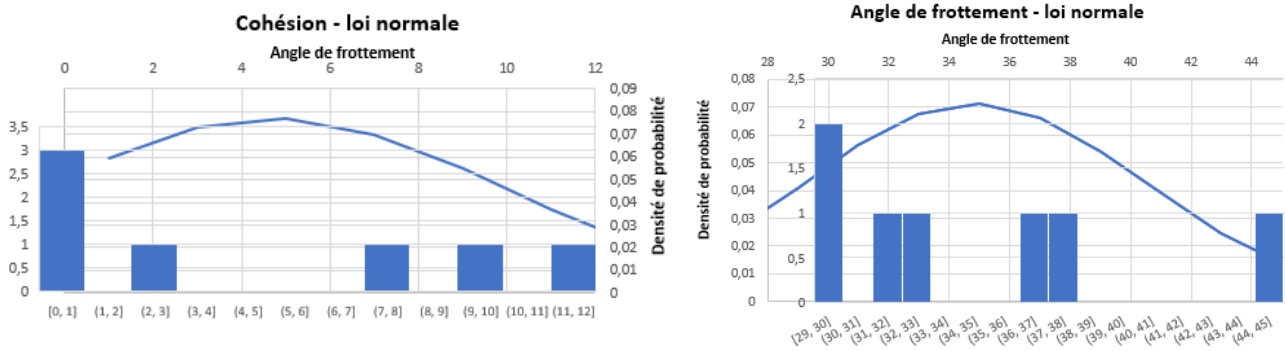


Figure 2. Distribution normale de la cohésion et de l'angle de frottement

Tableau 1. Caractéristiques des arènes granitiques

Paramètre	Cohésion (kPa)		Angle de frottement (°)	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Valeur	5	2	35	5

Les valeurs moyennes ($c=5\text{kPa}$, $\varphi=35^\circ$) sont retenues pour le calcul déterministe.

Le coefficient de variation (COV), défini comme le rapport entre l'écart-type et la moyenne, a été calculé en fonction des résultats précédents. Il a été démontré que les valeurs calculées à partir des résultats des essais étaient proches du COV de la littérature (Duncan, 2005) pour ce type de matériau (40 % pour la cohésion et 15 % pour l'angle de frottement), ce qui reflète la dispersion des points de données autour de la moyenne. Il s'agit d'un paramètre d'entrée pour les logiciels d'analyse probabiliste, qui indique le niveau d'incertitude associé aux données disponibles.

3.4. Résultats des calculs de stabilité

Afin de montrer l'influence de la COV sur les analyses de stabilité des pentes, trois cas ont été calculés comme présenté dans le tableau 1. Il convient de noter que les plages de valeurs ont été adaptées afin de conserver des valeurs réalistes de la cohésion et de l'angle de frottement (par exemple, la cohésion est positive et l'angle de frottement est inférieur à 35°).

Tous les calculs ont été effectués avec les mêmes valeurs moyennes.

Tableau 2. Caractéristiques probabilistes des matériaux

	Cohésion (kPa)				Angle de frottement (°)			
	Moyenne	Ecart-type	COV	Plage	Moyenne	Ecart-type	COV	Plage
Cas 1	5	2	40%	[0 kPa; 15 kPa]	35	5	15%	[20°; 35°]
Cas 2	5	1	20%	[0 kPa; 10 kPa]	35	5	15%	[20°; 35°]
Cas 3	5	2	40%	[0 kPa; 15 kPa]	35	1,7	5%	[26,5°; 35°]

1,411

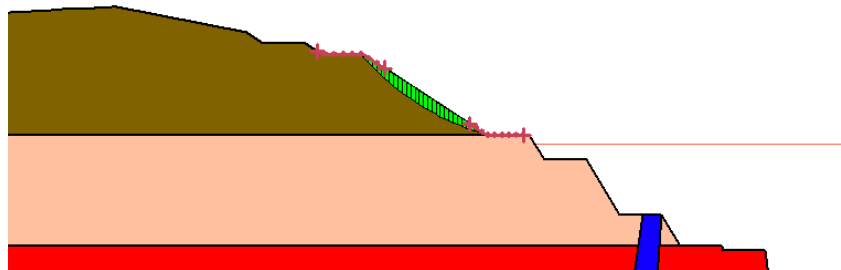


Figure 3. Cercles de glissement et facteur de sécurité – Calcul déterministe – Cas 1

Le calcul déterministe effectué avec une cohésion de 5 kPa et un angle de frottement de 35° a permis d'obtenir un facteur de sécurité de 1,4.

L'expression de la probabilité de rupture est telle que :

$$PF = \frac{\text{Nombre de simulations de Monte – Carlo avec un FS} < 1}{\text{Nombre total de simulations}}$$

Les calculs probabilistes réalisés pour les 3 cas cités ci-dessus ont donné les résultats présentés dans le tableau suivant. Le FS min est le facteur de sécurité minimal obtenu avec toutes les simulations réalisées. Il est supposé qu'il corresponde au cas avec les valeurs minimales des paramètres du sol.

Tableau 3. Résultats des calculs probabilistes

	COV (cohésion)	COV (Angle de frottement)	PF (%)	FS min
Calcul déterministe (c=5 kPa, $\phi = 35^\circ$)	-	-	-	1,4
Cas 1	40%	15%	6,7	0,7
Cas 2	20%	15%	5,6	0,8
Cas 3	40%	5%	0,05	1

Les 3 fonctions de densité de probabilité sont présentées dans la figure 4 (graphe à gauche). La probabilité de rupture étant calculée comme la surface sous la distribution du coefficient de sécurité quand il est inférieur à 1. Ces surfaces sont présentées dans le graphe de droite.

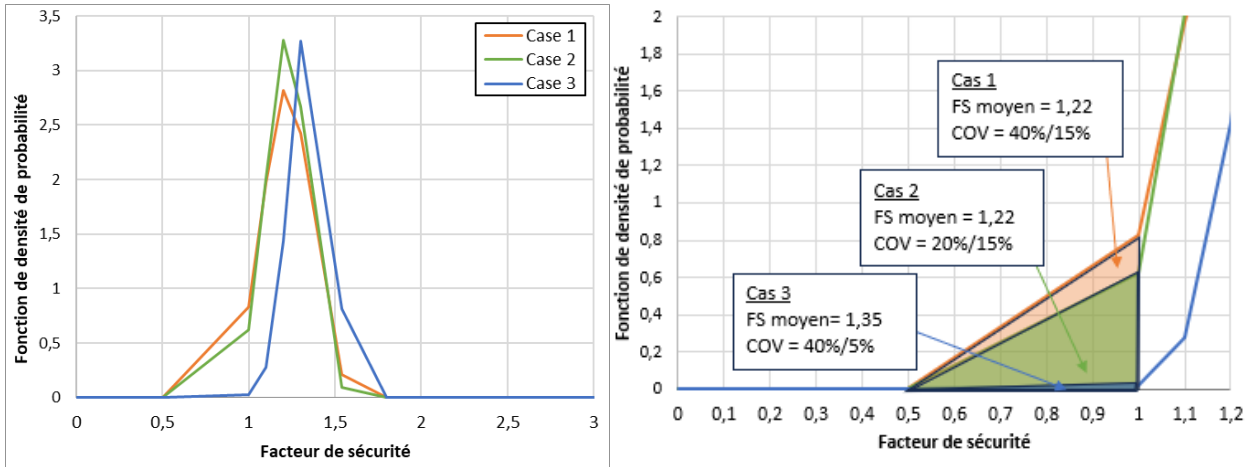


Figure 4. Distribution normale du facteur de sécurité

Le facteur de sécurité (supérieur à 1.3) obtenu avec les méthodes déterministes est attendu dans le cas où la cohésion et l'angle de frottement correspondent aux valeurs définies précédemment. Une analyse basée sur ce calcul permet de justifier la stabilité de la pente étudiée.

Cependant, les calculs probabilistes réalisés avec une plage de valeurs de cohésion et d'angle de frottement, ce qui reflète la variabilité spatiale des propriétés du sol, ont permis de voir qu'une rupture des terrains est possible : la probabilité de rupture étant estimée entre 0,05 à 6,7%.

Les tableaux et graphes précédents montrent l'importance du rôle du coefficient de variation dans la détermination de la probabilité de rupture. Cette dernière diminue de 6,7% à 5,6% avec un COV (cohésion) décroissant de 40% à 20% et de 6,7% à 0,05% avec un COV (angle de frottement) décroissant de 15% à 5%.

Pour cette étude en particulier, nous remarquons que le COV de la cohésion a très peu d'effet. Ceci est dû au fait que la plage de valeurs utilisée dans les calculs ne respecte pas les valeurs minimales et maximales obtenues avec les COV proposés, étant donné que la cohésion des arènes granitiques ne peut pas être négative ou supérieure à 15 kPa.

Les résultats obtenus dans les cas 1 et 2 n'ont pas permis de justifier la stabilité des pentes vis-à-vis des exigences du client (une probabilité un facteur de sécurité déterministe compris entre 1,3 et 1,5 et une probabilité de défaillance inférieure à 5%).

Afin de pouvoir réduire le coefficient de variation, il a été jugé nécessaire de réaliser des essais de cisaillement complémentaires pour définir de façon plus précise les paramètres du sol.

3.5. Analyse statistique des données issues de la campagne d'essais de 2023

Dix essais complémentaires à la boîte de cisaillement ont été effectués en octobre et novembre 2023 dans le laboratoire d'essais géomécaniques d'Antea Group, afin de préciser la caractérisation des matériaux du site. Le tableau 4 présente la synthèse des résultats obtenus, en particulier la cohésion et l'angle de frottement selon le critère de pic (C_p , ϕ_p) et selon le critère d'état final (C_f , ϕ_f). La synthèse des résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4. Les essais réalisés confirment l'homogénéité de la classe matériaux retenus.

Nous pouvons remarquer que la variabilité de l'angle de frottement est plus faible que celle prise en compte dans les calculs précédents. Le COV passe de 15% à 10%. Par

contre la variabilité de la cohésion a augmenté mais avec une fourchette de valeurs plus élevée. Globalement, la validité des paramètres sélectionnés est renforcée par les essais complémentaires.

Tableau 4. Synthèse des résultats des essais de cisaillement réalisés en 2023

	C'p	ϕ' p	C'f	ϕ' f
Unité	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)
Moyenne	23	38	10	38
Ecart type	16	4	9	4
COV	72%	11%	91%	10%
min	2	29	1	29
max	48	44	28	42

3.6. Analyse des résultats

Des calculs de stabilité complémentaires ont été réalisés sur la base des nouvelles valeurs d'angle de frottement. Ainsi le cas 4 a été défini tel que :

Tableau 5. Caractéristiques probabilistes des matériaux

	Cohésion (kPa)				Angle de frottement (°)			
	Moyenne	Ecart-type	COV	Plage	Moyenne	Ecart-type	COV	Plage
Cas 1	5	2	40%	[0 kPa; 15 kPa]	35	5	15%	[20°; 35°]
Cas 2	5	1	20%	[0 kPa; 10 kPa]	35	5	15%	[20°; 35°]
Cas 3	5	2	40%	[0 kPa; 15 kPa]	35	1,7	5%	[26,5°; 35°]
Cas 4	5	2	40%	[0 kPa; 15 kPa]	35	4	10%	[25°; 35°]

Tableau 6. Résultats des calculs probabilistes

	COV (cohésion)	COV (Angle frottement)	de	PF (%)	FS min
Cas 4	40%	10%		2,3	0,85

La probabilité de rupture du cas 4 répond aux exigences du client.

4. Conclusion

Sur la base des résultats présentés dans les paragraphes précédents, nous pouvons déduire que l'analyse probabiliste dans le cadre de calculs de stabilité des pentes permet de prendre en compte les incertitudes liées aux paramètres du sol.

Les essais de cisaillement réalisés en laboratoire permettent de calculer la moyenne, l'écart-type et par la suite le coefficient de variation de la cohésion et de l'angle de

frottement. Le coefficient de variation déduit à partir de ces valeurs est introduit dans les logiciels de calculs tel que SLOPE/W utilisé dans le cadre de cette étude.

Les calculs de stabilité ont montré que la probabilité de rupture est directement liée au COV et qu'elle peut être diminuée en réduisant cette valeur à l'aide de mesures complémentaires.

5. Références bibliographiques

- Abdulai M and Sharifzadeh M (2021) Probability methods for stability design of open pit rock slopes: an overview. *Geosciences*, 11(8), 319
- Alonso, EE (1976) Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays. *Géotechnique*, 26(3), pp 453–472.
- Dubost, J. (2009) Variabilité et incertitudes en géotechnique : de leur estimation à leur prise en compte. Thèse de doctorat. Bordeaux 1.
- Duncan J., Wright S. (2005). Soil Strength and Slope Stability. JohnWiley & Sons Inc, pp. 293.
- El-Ramly H, Morgenstern NR & Cruden DM (2002) Probabilistic slope stability analysis for practice. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3), pp 665-683.
- Frank R (2004) *Designers' guide to EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical design-General rules* (Vol. 17). Thomas Telford.
- Guo, X., Dias, D., & Pan, Q. (2019). Probabilistic stability analysis of an embankment dam considering soil spatial variability. *Computers and Geotechnics*, 113, 103093.
- Harr ME (1977) *Mechanics of particulate media — a probabilistic approach*. McGraw-Hill, New York, 543 pp.
- Magnan, J.P. (1982) Les méthodes statistiques et probabilistes en mécanique des sols.
- Morgenstern N. R and Price V. E (1965) The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1), 79–93
- Obregon C and Mitri H (2019) Probabilistic approach for open pit bench slope stability analysis—A mine case study. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(4), 629-640.
- Pieczynska (2013), Evaluation of bearing capacity of shallow strip foundation using the random finite element method, 3rd International Symposium on Computational Geomechanics.
- Selmi M, Ltifi M and Bel Hadj Ali N (2006) Application de la méthode de Monte Carlo dans l'analyse de la stabilité des pentes. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG 2006)*, 27-29.
- Siacara A T, Napa-García G F, Beck A T, et al. Reliability analysis of earth dams using direct coupling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, 12(2): 366-380.
- Tang WH, Yucemen MS and Ang AHS (1976) Probability-based short-term design of slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 13(3), pp 201–215.
- Ullah S, Khanb MU & Rehmana GA (2020) A brief review of the slope stability analysis methods. *Geological Behavior (GBR)*, 4(2), pp 73-77.