

UTILISATION D'UNE MÉTHODE PROBABILISTE POUR LE DIMENSIONNEMENT DU SOUTÈNEMENT D'UN TUNNEL EN COQUE BOULONNÉE

USE OF PROBABILISTIC METHOD IN TUNNEL ROCKBOLT SUPPORT DESIGN

Amélie LEBOURG¹, Grégoire ROUSSELOT¹, Adrien SAITTA¹, Bertrand COSME²

¹ Egis, France

² Groupement d'entreprises LYTO, TELT C006/C007, France

RÉSUMÉ – Les études de dimensionnement du soutènement de la nouvelle galerie logistique (GLO) creusées en parallèle de l'actuelle descenderie de Saint-martin-La-Porte se sont basées sur le retour d'expérience des creusements des anciennes galeries voisines SMP1 et SMP-3a dans le cadre du projet TELT. Elles ont permis de connaître les principaux enjeux du creusement de la galerie GLO. La communication présente l'application de la méthode probabiliste utilisée afin de dimensionner de manière cohérente le soutènement de l'ouvrage.

ABSTRACT – The design of the tunnel rockbolts is based on a probabilistic method using feedback from the excavation of the SMP1 and SMP-3a.

1 Introduction

Le projet TELT a pour but la réalisation d'une ligne de chemin de fer transfrontalière entre la France et l'Italie. Les travaux actuels se concentrent autour du tunnel de base d'une longueur de 57.5 km permettant de traverser le massif des alpes. Le tunnel de base est séparé en différents chantiers opérationnels et lots.

La galerie logistique ouest (GLO), est un nouvel ouvrage inscrit dans la descenderie de Saint-Martin la Porte. Elle se situe 200 m à l'ouest de la descenderie SMP1 réalisée en 2003. La galerie GLO est réalisée parallèlement à la descenderie SMP1 et intercepte la descenderie P3a de SMP4 au PM 300. La nouvelle galerie logistique mesure 500 m de long et 10,5 m de large, conçue dans l'objectif de faciliter la logistique lors de l'excavation du tunnel de base.

Les travaux de construction de la galerie ont démarré en février 2023 et se sont terminés en décembre de la même année.

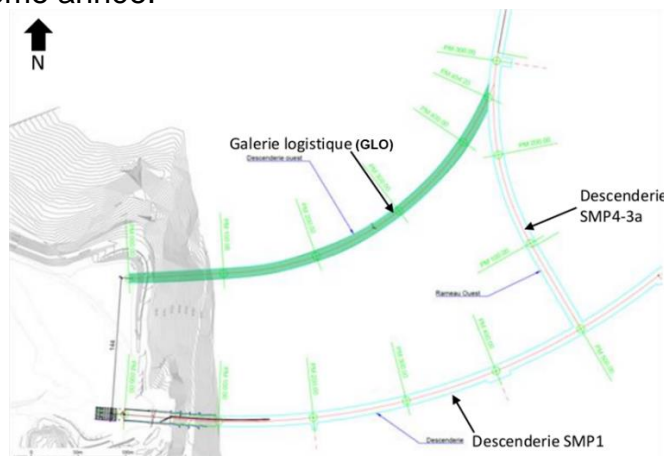


Figure 1. Plan de situation de la nouvelle galerie logistique (GLO) sur le site de Saint-Martin-La-Porte

L'objectif de l'étude est de dimensionner le soutènement de la galerie logistique. Afin d'analyser la variation des valeurs d'orientation et pendage des discontinuités, le logiciel Unwedge a été utilisé via la méthode probabiliste qu'il propose.

2 REX des anciennes descenderies SMP1 et SMP-3a

2.1 Géologie

Les descenderies SMP1 et SMP-3a, précédemment réalisées sur le site de Saint-Martin la-Porte, donnent une très bonne idée des conditions géologiques, hydrogéologiques et géotechniques pour la construction de la GLO.

Le creusement des descenderies a montré que les terrains traversés sont de nature rocheuse.

La descenderie SMP1 traverse les terrains de l'unité du Perron des Encombres. Elle est composée successivement des calcaires marneux du Malm (jmCM), des calcaires massifs du Dogger (jmC), les schistes noirs (j1) sur une faible épaisseur, des calcaires lités à silex du lias (I1-4), des calcaires et schistes (t7) peu épais, des dolomies et argilites (tsD).

La descenderie SMP4-3a perpendiculaire à la descenderie SMP1 traverse les calcaires du lias (I1-4) et les dolomies et argilites (tsD).



Figure 2. Coupe géologique prévisionnelle de la galerie logistique

L'analyse des relevés de front des ouvrages déjà réalisés (SMP1 et SMP-3a) a permis de déterminer les principales familles des discontinuités pouvant intercepter la galerie logistique. Les orientations et pendages des discontinuités prises en compte pour l'étude sont les suivantes :

- Stratification : N95±25, 40±15
- Fracture A : N200±10, 50±20
- Fracture B : N345±15, 65±20
- Fracture C : N60±20, 45±15

Le creusement des deux descenderies nous apprend qu'aucune venue d'eau importante n'est à prévoir lors du creusement de la galerie logistique.

Les deux galeries (SMP1 et SMP-3a) ont été excavées en méthode traditionnelle. Le soutènement mis en place dans les descenderies se compose d'une coque en béton projeté boulonnée.

3 Choix du soutènement de la nouvelle galerie GLO

À l'aide des informations issues de la construction des descenderies, trois soutènements différents ont été dimensionnés afin de conforter la galerie logistique. Les trois répondent au critère de rupture de mécanisme de blocs.

Le diagramme de (Russo 2014) permet d'identifier les plages d'utilisation des soutènements.

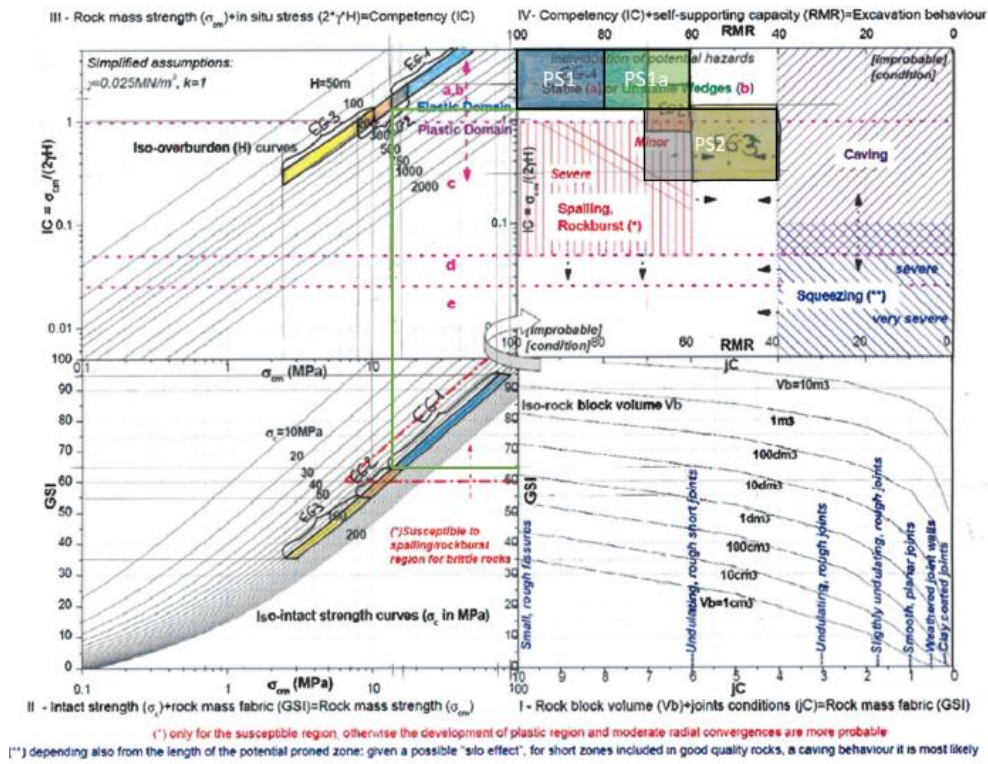


Figure 3. Plage d'utilisation des soutènements (Russo 2014)

En fonction de la répartition selon (Russo 2014) détaillé au-dessus, les soutènements proposés sont les suivants :

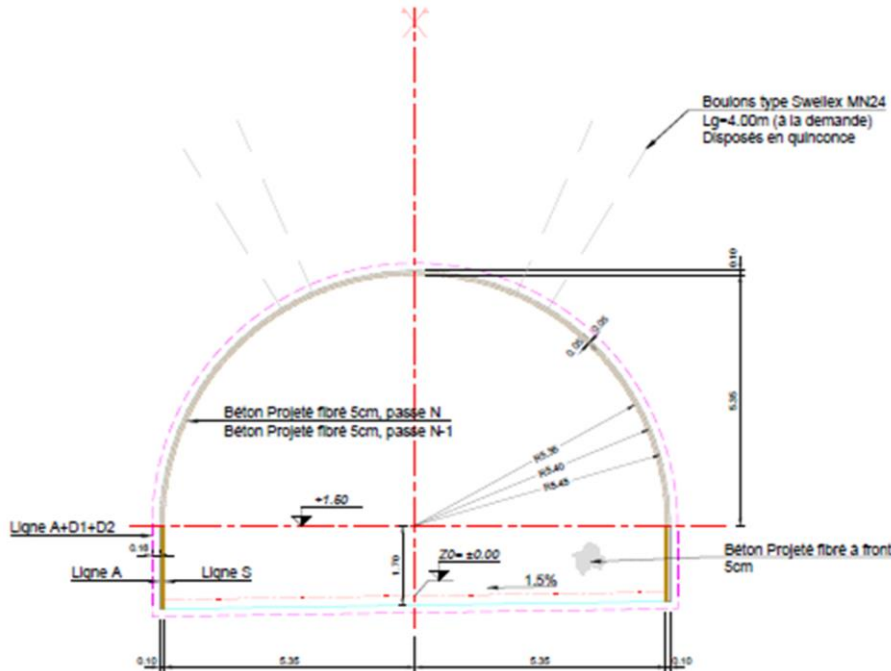


Figure 4. Soutènement PS1

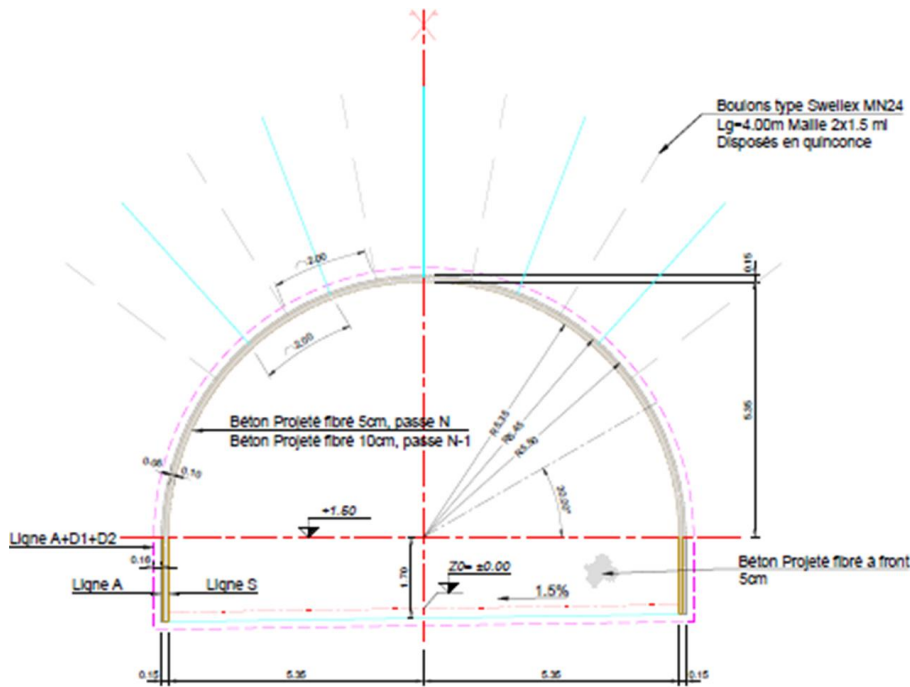


Figure 5. Soutènement PS1A

Boulon Swellex MN24
Longueur 4 m
Maille 2.00x1.50 ml

Béton projeté de protection, ép. 5 cm
Béton projeté de soutènement, ép. 10 cm
Béton projeté au front, ép. 5 cm

Plage d'application :
GSI compris entre 66 et 85

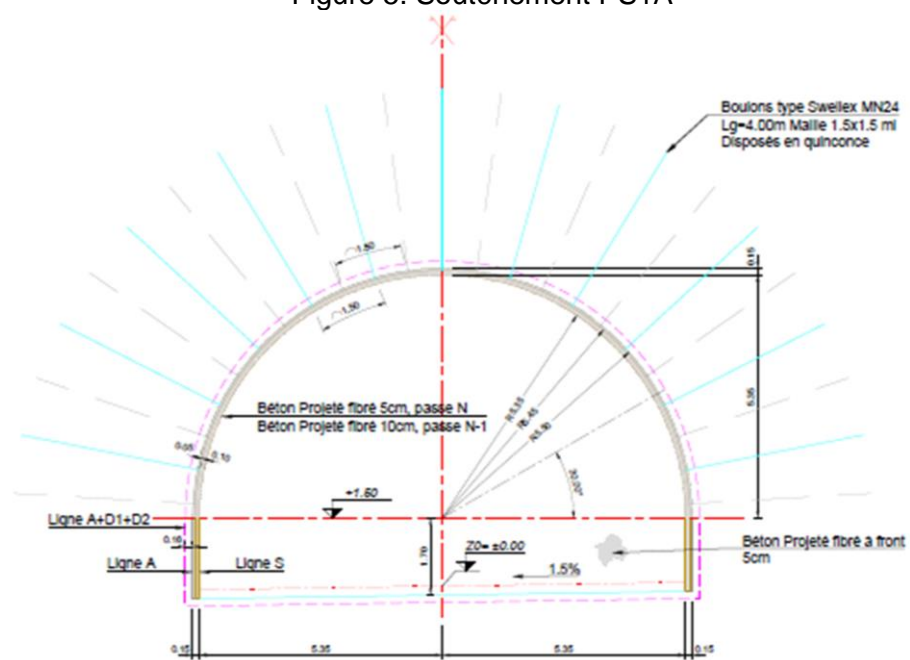


Figure 6. Soutènement PS2

Boulon Swellex MN24
Longueur 4 m
Maille 1.50x1.50 ml

Béton projeté de protection, ép. 5 cm
Béton projeté de soutènement, ép. 10 cm
Béton projeté au front, ép. 5 cm

Plage d'application :
GSI compris entre 36 et 65

Une étude déterministe basée sur des modèles Unwedge a été réalisée afin de dimensionner les soutènements PS1A et PS2. Les paramètres géomécaniques caractéristiques et les orientations et pendages caractéristiques des terrains traversés ont été déterminés sur la base des analyses décrites ci-dessus.

Par la suite une étude probabiliste est réalisée afin de vérifier la pertinence des soutènements de la galerie logistique.

4 Modélisation des variations d'orientation et de pendage

4.1 Méthode probabiliste

Une étude de sensibilité a été réalisée via le module de calcul probabiliste du logiciel Unwedge. Son but est de vérifier si le choix du maillage, de la longueur des boulons ainsi

que l'épaisseur du béton projeté sont applicables à la majorité des combinaisons de discontinuités rencontrées.

Des informations statistiques sont nécessaires pour tenir compte des incertitudes vis-à-vis des orientations et pendages des discontinuités. Des séquences de nombres aléatoires sont utilisées dans Unwedge, en conjonction avec la méthode d'échantillonnage, pour générer des échantillons de données d'entrée aléatoires pour l'analyse probabiliste. La méthode d'échantillonnage de l'Hypercube Latin est utilisée pour modéliser les échantillons. La méthode l'Hypercube Latin est choisie car en utilisant 1000 échantillons, elle produit des résultats comparables à une analyse de 5000 échantillons utilisant la méthode de Monte-Carlo.

La variation des orientations et des pendages est modélisée via une loi de distribution uniforme avec comme paramètres :

- Valeur moyenne
- Écarts relatifs minimum et maximum par rapport à la valeur moyenne.

Les paramètres de la loi de distribution sont détaillés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1. Paramètre de la loi de distribution uniforme

	Direction de pendage			Pendage (°)		
	Valeur moyenne	Écart relatif minimum (°)	Écart relatif maximum (°)	Valeur moyenne	Écart relatif minimum	Écart relatif maximum
S 0	N95	25	25	40	15	15
F A	N200	10	10	50	20	20
F B	N345	15	15	65	20	20
F C	N60	20	20	45	15	15

4.2 Résultat de l'étude probabiliste

Lors des calculs utilisant la méthode probabiliste, on s'intéresse en premier lieu à la probabilité de défaillance, ce qui correspond à un facteur de sécurité inférieur à 1 ($FS < 1$). Il est rappelé que les calculs de probabilités ne servent pas à donner une probabilité de rupture des blocs, mais à identifier la cohérence du soutènement (longueur et maillage des boulons, épaisseur du béton projeté), peu importe l'orientation des discontinuités rencontrée.

Les résultats des calculs probabilistes indiquent que la majorité des blocs est soutenue par le boulonnage et que tous les blocs sont retenus après la mise en place du béton projeté, Figure 7. Malgré tout, certains blocs passent à travers le maillage des boulons. Ces blocs doivent être identifiés afin de vérifier si le maillage des boulons est correct. Dans la Figure 8 on peut voir deux types de blocs non confortés par boulonnage :

- Des blocs de faible dimension (avec un poids inférieur à 0.1 MN). Ces blocs seront confortés par le béton projeté ou bien pour les plus petits d'entre eux qui seront purgés.
- Des blocs de plus grande dimension, avec des longueurs d'Apex très élevées. Ces blocs souvent très effilés ne sont pas très réalistes et souvent écartés de l'étude.

À la suite de la mise en place du béton projeté, la probabilité de rupture du soutènement est quasi nulle. Cela signifie que le soutènement choisi permet de soutenir tous les éventuels blocs instables.

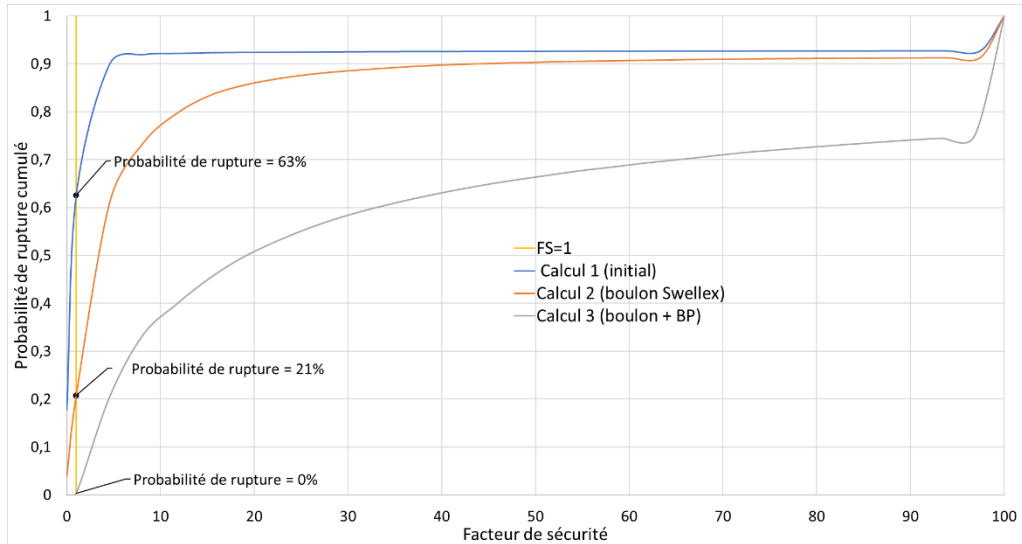


Figure 7. Probabilité de rupture du soutènement PS2

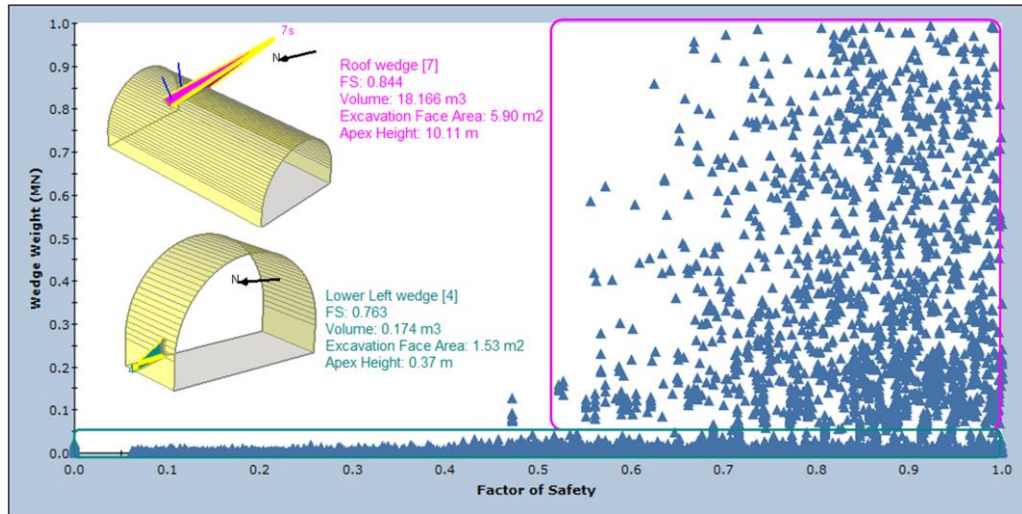
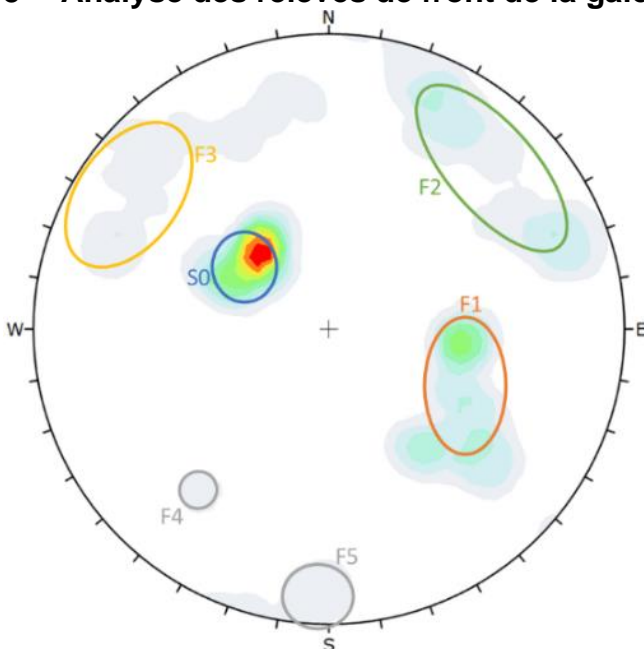


Figure 8. Visualisation des blocs instables à la suite du boulonnage, PS2

5 Analyse des relevés de front de la galerie logistique



À la suite du creusement de la galerie logistique, un rétro-calcul est effectué afin de vérifier la cohérence du calcul probabiliste.

Les relevés de front sont analysés afin de retrouver les différentes familles de discontinuités présentes le long de la galerie logistique. La stratification et 6 familles de fracture sont détectées le long du creusement de la galerie logistique. Le stéréogramme de densité de concentration de pôle, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, permet de repérer les familles de discontinuité et d'identifier leur

Figure 9 Stéréogramme de densité de concentration de pôle de famille de discontinuité (hémisphère inférieur)

orientation et pendage. Le Tableau 2 résume les orientations et pendages ainsi que leur variation des différentes discontinuités.

Tableau 2. Synthèse des discontinuités de la galerie logistique

	Orientation de pendage	Pendage (°)	Type
S0	N130±25	40±10	Stratification
F1	N300±35	55±20	Fracture majeure
F2	N225±35	75±20	Fracture majeure
F3	N130±35	70±15	Fracture majeure
F4	N50±15	50±20	Fracture mineure
F5	N5±5	80±10	Fracture mineure

Les discontinuités retrouvées dans la galerie GLO sont légèrement différentes de celles retrouvées lors du creusement de SMP1 et P3a. L'orientation de la stratification dans la GLO a légèrement changé. La famille de fractures n° 2 de la GLO peut être rapprochée de la famille de fractures A de SMP1 et la famille 3 de la GLO est similaire à la famille de fracture B. Les familles 3 et 5 n'ont pas été retrouvées lors du creusement des descenderies. La famille de fractures n°4 n'est pas majoritairement rencontrée lors de l'excavation de la GLO alors qu'elle est très nettement détectée dans les descenderies à travers la famille de fractures C.

Une analyse déterministe a montré que l'ensemble des blocs est soutenu par le boulonnage, pour les blocs de dimension supérieure à celle du maillage des boulons, et par le béton projeté, pour les blocs de dimension inférieure à celle du maillage des boulons.

Du fait du plus grand nombre de discontinuités, la probabilité de rupture est plus élevée avec les discontinuités rencontrées dans la galerie logistique, Figure 10. Mais tous les blocs sont retenus après la mise en place du béton projeté.

Après le boulonnage, les mêmes types de blocs instables sont retrouvés, soit des blocs très effilés écartés de l'étude et des blocs de petites dimensions qui seront soutenus par le béton projeté.

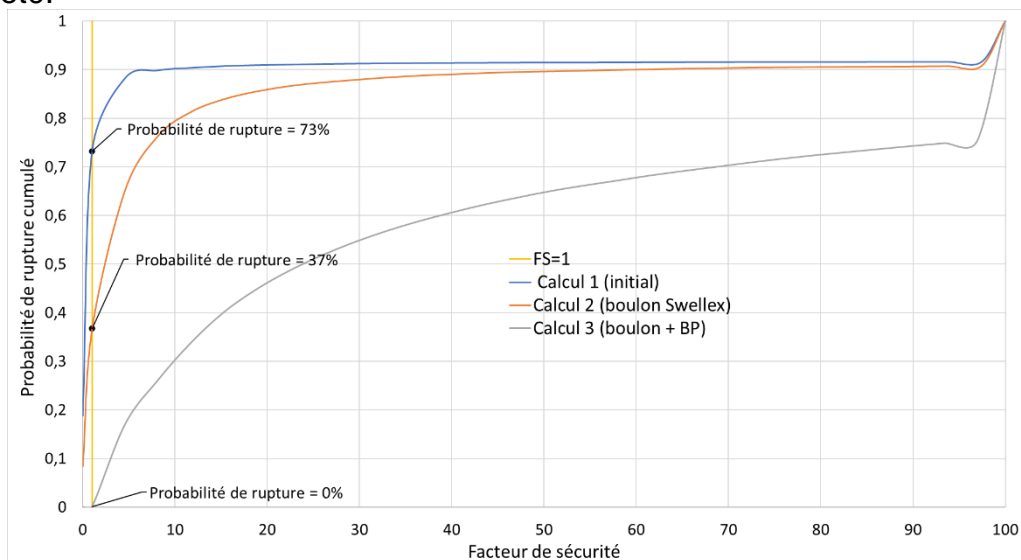


Figure 10. Probabilité de rupture du soutènement PS2 à la suite du rétro-calcul

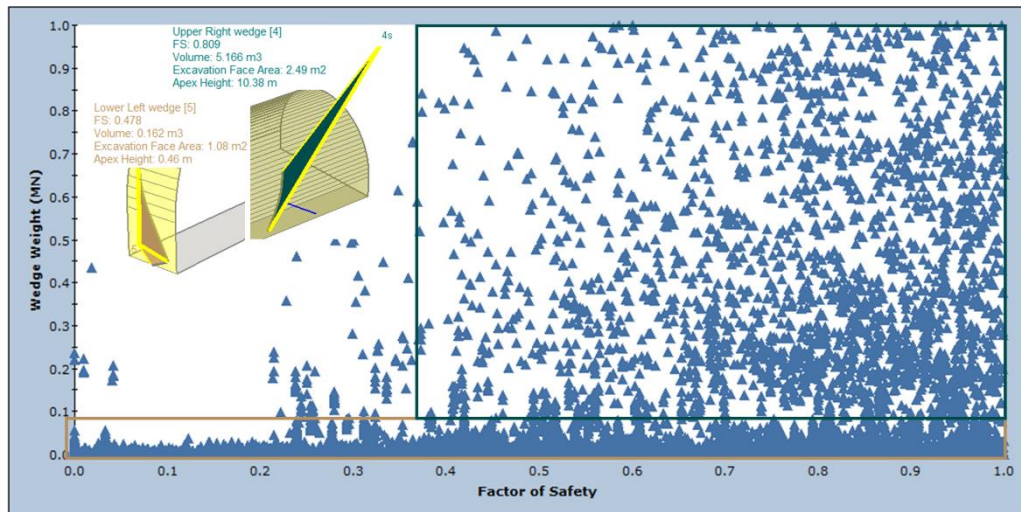


Figure 11. Visualisation des blocs instables à la suite du boulonnage, PS2 à la suite du rétro-calcul

6 Conclusion

Les études de dimensionnement du soutènement de la galerie logistique sont basées sur le retour d'expérience des creusements des anciennes descenderies SMP1 et SMP-3a sur le site de Saint-Martin-La-Porte. Ces retours d'expérience permettent de connaître les principaux enjeux dans le creusement de la nouvelle galerie GLO. Ils nous indiquent notamment la nature des terrains excavés, le mécanisme de rupture des terrains ainsi qu'une première idée sur les discontinuités qui peuvent être présentes le long de la galerie logistique.

Le calcul probabiliste réalisé en phase d'étude a été réalisé sur la base de l'utilisation du module correspondant dans le logiciel Unwedge. Il permet de prendre en considération les variations d'orientation et de pendage des discontinuités. Il permet de vérifier également la cohérence du soutènement en cas de changement brusque d'orientation des fractures.

Cette méthode probabiliste apparaît appropriée à toutes les phases des études et travaux afin d'évaluer la cohérence du soutènement proposé (longueur des boulons et maillage, épaisseur du béton projeté) vis-à-vis des incertitudes liées aux valeurs des paramètres des discontinuités du massif rocheux.

7 Références bibliographiques

G Russo, 2014, "An update of the "multiple graph" approach for the preliminary assessment of the excavation behaviour in rock tunnelling" *Tunnelling and Underground Space Technology* n°41, p 74-81

Rocscience. (2002). *UnWedge version 2.37 theory Manual*