

# CALCUL DES BOULONS ET COEFFICIENTS DE SECURITE

## ROCK BOLT DESIGN WITH PARTIAL SECURITY FACTORS

Philippe LAHEURTE<sup>1</sup>, Didier VIRELY<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cerema, Toulouse, France

<sup>2</sup> Cerema, Toulouse, France

**RÉSUMÉ** – Les conditions de dimensionnement d'un boulon au rocher suivant les principes des états limites et avec des facteurs de sécurité partiels conformes au formalisme des Eurocodes sont décrites. Un exemple pratique est présenté.

**ABSTRACT** – Rock bolt design is presented to conform to the Eurocode standard. An application example has been given.

### 1. Introduction

La nécessité de disposer de règles communes pour dimensionner les confortations par boulonnage en milieu rocheux s'est imposée en France. Une réflexion a été menée en vue d'appliquer les règles en vigueur définies dans les Eurocodes (NF EN 1990/A1 et NF EN 1997-1/A1), soit l'usage des coefficients de sécurité partiel et le dimensionnement aux états limites. Nous présentons le cas d'un bloc rocheux conforté par des barres d'acier, ou boulons.

### 2. Référentiel

Le document de référence est aujourd'hui l'Eurocode 7, NF EN 1997-1/A1. Quatre méthodes de calcul sont proposées :

- Dimensionnement par le calcul ;
- Dimensionnement par mesures prescriptives ;
- Dimensionnement via des essais de chargement et essais sur modèles ;
- Dimensionnement et suivi par une approche observationnelle.

Dans une large mesure aujourd'hui, les dimensionnements des boulons sont fondés sur des mesures prescriptives, voire une approche totalement empirique.

L'Eurocode 7 impose la réalisation d'essais pour les dispositifs géotechniques en traction. Les boulons sont couverts par des essais d'arrachage définis dans la norme XP P94-444. Ces essais permettent d'obtenir un coefficient de frottement latéral unitaire  $q_s$ . Par ailleurs, les paramètres de cisaillement sur une discontinuité rocheuse peuvent être obtenus en laboratoire, selon la norme expérimentale XP P94-424 (cf. ISRM 2007).

Le guide « Protection contre les instabilités rocheuses, dimensionnement et exécution des boulons » de 2017 propose une méthode de calcul pour la stabilisation d'un bloc rocheux glissant sur une discontinuité.

Ce dimensionnement s'appuie sur une approche par le calcul et utilise des coefficients de sécurité partiels.

### 3. Approche de calcul

L'Eurocode 7 propose trois approches de calcul, selon que l'on pondère ou non les actions ou leurs effets, les propriétés des matériaux, et les résistances. La France a fait le choix dans son annexe nationale de pondérer les actions et les résistances ; concernant les propriétés des matériaux, soit elles ne sont pas pondérées via l'approche de calcul 2, soit elles le sont via l'approche de calcul 3. En ingénierie des roches, il n'y a pas de travaux permettant de déterminer des facteurs partiels pour les propriétés du matériau roche ou massif rocheux. C'est pourquoi l'approche de calcul 2 s'impose (ELU GEO) ; c'est celle retenue pour le guide de 2017.

## 4. Données nécessaires au dimensionnement

### 4.1. Géométrie

La première approche consiste à définir la géométrie du bloc à conforter et les caractéristiques de la surface de glissement. Les dimensions prises sur le terrain, dans des conditions souvent difficiles (travail sur corde) sont considérées comme des majorants du volume du bloc et donc de sa masse. Il n'est donc pas pris en compte de sécurité sur ce paramètre. Ce point est explicité dans l'Eurocode 7 à la clause 2.4.6.3 (1).

Le relevé de la discontinuité est effectué sur le terrain suivant la convention AFTES. Le vecteur pendage pris en compte, et plus spécifiquement le pendage choisi, sont également des majorants.

### 4.2. Propriétés mécaniques

#### 4.2.1. Caractéristiques de la discontinuité

La réalisation d'un essai de cisaillement sur discontinuité permet d'obtenir trois paramètres :

- L'angle de frottement  $\varphi_{mes}$  ;
- La dilatance  $\delta_{mes}$  ;
- La cohésion  $c_{mes}$ .

#### 4.2.2. Caractéristiques du frottement roche-clou

L'essai d'arrachement in-situ permet d'obtenir une résistance limite  $R_t$ . Les prescriptions usuelles pour la composition des coulis font que l'interface acier-coulis présente une résistance supérieure à celle mobilisée à l'interface coulis-rocher.

## 5. Coefficients de corrélations et facteurs de modèle

Pour passer des valeurs mesurées en laboratoire ou sur le terrain aux valeurs caractéristiques, des facteurs de corrélations doivent être définis.

Dans le cas des essais d'arrachements, ces facteurs sont identiques à ceux à prendre en compte pour les pieux en traction (principe 8.1.1 (3) de l'amendement A1 de l'Eurocode 7, avril 2014). Il en découle la valeur caractéristique de la résistance en traction d'un boulon.

Pour déterminer le frottement sur discontinuité, deux approches sont possibles, selon que des essais aient été pratiquées ou non :

- Avec essai : le coefficient de corrélation  $\xi_{\varphi\text{dis}}$  est pris égal à 1 ;
- En l'absence d'essai, un facteur de modèle est introduit :  $\gamma_{\varphi\text{dis}}$ . Ce facteur prend une valeur de 1,5. Dans l'esprit des Eurocodes l'ensemble des valeurs caractéristiques doivent être obtenues à partir d'essais, d'où une pénalisation par un tel coefficient.

La résistance au cisaillement sur discontinuité est contrôlée par les trois paramètres décrits au chapitre 4. Dans l'approche proposée, lorsque des essais de laboratoire sont effectués, la dilatance et la cohésion qui ont pu être mesurées sont négligées, seule la valeur de l'angle de frottement est prise en compte. La dilatance est effective lorsque qu'un déplacement se produit ; le boulonnage vise à empêcher tout déplacement relatif des épontes. Ne pas tenir compte de la cohésion va également dans le sens de la sécurité.

En l'absence d'essais, la valeur de l'angle de frottement est prise à dire d'experts. Une pondération est introduite par le facteur de modèle.

La valeur caractéristique de l'angle de frottement sur discontinuité est le résultat de cette pondération.

## 6. Obtention des résistances de calcul

Les coefficients  $\gamma_M$  qui permettent d'obtenir les valeurs de calcul des paramètres de terrain à partir des valeurs caractéristiques sont pris égaux à 1 (approche de calcul 2).

Les coefficients  $\gamma_R$  utilisés pour obtenir les résistances de calcul sont :

- Pour la prise en compte du frottement roche-boulon : ceux donnés pour l'ensemble R2 du tableau A.7 de l'Eurocode 7 partie 1, annexe A.
- Pour la résistance de la discontinuité :  $\gamma_{R\text{;dis}} = 1,1$  (évalué à partir de la base de données du Cerema Sud-Ouest).

## 7. Exemple d'application pour un bloc rocheux glissant sur un plan

Le séisme dans cet exemple situé en Aveyron n'est pas pris en compte.

### 7.1. Données d'entrée

Un bloc rocheux calcaire du Bajocien présente les caractéristiques suivantes :

- Epaisseur : 3,0 m
- Aire de contact : 22,3 m<sup>2</sup>
- Masse volumique : 2 720 kg/m<sup>3</sup>

La masse à conforter est de 182 tonnes. Ce bloc est positionné sur une discontinuité présentant un pendage de 75°.



Figure 1 : bloc calcaire

Un essai de cisaillement sur la discontinuité arrière du bloc a été conduit sur un échantillon carotté en 92 mm de diamètre. Les résultats obtenus sont :

- Angle de frottement  $\varphi_{mes} = 41^\circ$
- Dilatance  $\delta_{mes} = 2^\circ$
- Cohésion  $c_{mes} = 0,016 \text{ MPa}$



Figure 2 : essai de cisaillement sur discontinuité calcaire

Il est prévu d'utiliser des boulons présentant les caractéristiques suivantes :

- Diamètre du boulon :  $d = 40 \text{ mm}$
- Épaisseur sacrifiée à la corrosion :  $\Delta_d = 4 \text{ mm}$

- Limite élastique de l'acier  $\sigma_e = 500 \text{ MPa}$
- Diamètre de forage :  $\Phi = 90 \text{ mm}$
- Angle du forage / horizontale =  $10^\circ$

Trois essais d'arrachement donnent, pour une longueur scellée de 3 mètres et un forage de diamètre 90 mm, les résistances suivantes : 526 kN, 585 kN, et 562 kN. Pour trois essais in-situ, le facteur de corrélation  $\xi_1$  vaut 1,2 et  $\xi_2$  vaut 1,05 (cf tableau A.9, EN 1997-1).



Figure 3 : essai de traction de boulon

La valeur caractéristique de la résistance en traction du boulon est :

$$R_{t;k} = \min\left(\frac{(R_t; m)_{\text{moyen}}}{\xi_1}, \frac{(R_t; m)_{\text{min}}}{\xi_2}\right) \quad (1)$$

$$R_{t;k} = \min\left(\frac{558}{1,20}; \frac{526}{1,05}\right) = \min(465; 501) = 465 \quad (2)$$

La valeur de calcul de la résistance en traction  $R_{t;d}$  est :

$$R_{t;d} = \frac{R_{t;k}}{\gamma_{s;t}} = \frac{465}{1,15} = 404 \text{ kN} \quad (3)$$

Le frottement latéral unitaire  $q_{s;d}$  vaut :

$$q_{s;d} = \frac{R_{t;d}}{L \times D} = \frac{404}{3 \times \pi \times 0,090} = 476 \text{ kPa} \quad (4)$$

Pour la discontinuité,  $c$  et  $\delta$  sont pris égaux à 0. L'angle de frottement sur la discontinuité est :

$$\tan(\varphi_k) = \frac{\tan(\varphi_{mes})}{\xi_{\varphi,dis}} \quad (5)$$

## 7.2. Résultats

La méthode de calcul est fondée sur l'analyse de l'équilibre des forces le long de la discontinuité à l'arrière du bloc rocheux en considérant une rupture plane. Le critère de plasticité employé pour l'acier est celui de Von Mises, alors qu'une loi de Coulomb est appliquée pour la discontinuité rocheuse.

Les résultats sont décrits dans le Tableau 1.

Tableau 1 : résultats obtenus

		Approche traditionnelle	Approche Eurocodes
$F_{\text{nat}}$	Coefficient de sécurité naturelle	0,23	0,16
$N$	Nombre d'ancrages minimum	7	7
$F_{\text{obt}}$	Coefficient de sécurité (stabilité du bloc)	1,57	1,02
$F_{\text{scel}}$	Coefficient de sécurité du scellement	5,59	4,44

Dans ce cas particulier, on vérifie que le facteur partiel de résistance  $\gamma_{R,\text{dis}}$  permet de retrouver le même nombre de boulons qu'avec l'approche traditionnelle.

## 8. Conclusion

Afin de pallier le manque de méthode ou référentiel et fournir un support de calcul conforme aux Eurocodes, une nouvelle approche en vue de dimensionner les boulons au rocher est proposée. Plusieurs développements doivent être apportés pour pleinement mettre en œuvre les principes de dimensionnement aux états limites avec une approche semi-probabiliste.

La nouvelle génération des Eurocodes, en cours d'élaboration, intégrera pleinement l'ingénierie des roches. Les principales avancées qui doivent être menées sont :

- Une meilleure prise en compte du comportement de l'acier du boulon, en se référant à l'Eurocode 2 pour la partie scellée ;
- Les conditions d'additivité des différents boulons nécessaires à la stabilisation d'une structure rocheuse, en fonction de leurs inclinaisons réelles ;
- En procédant à une évaluation des coefficients de sécurité partiels par une approche statistique, et en particulier par une approche fiabiliste du type FORM (First Order Reliability Method). Une telle approche est décrite par El Matarawi et Harrison (2017).

Le cas simple présenté a permis un développement conduisant à un dimensionnement conforme au règlement en vigueur. Le calcul complet d'un boulonnage dans un massif rocheux discontinu nécessite encore des développements. De plus, des modèles d'interaction types Pellet (1993), Maiolino et Pelllet (2015) permettent une prise en compte plus fine de l'interaction boulon/coulis/rocher. Un développement opérationnel de ce dernier critère est en cours.

## 9. Références bibliographiques

El Matarawi A., Harrison J.P. (2017). Calibrated Partial Factors for Support of Wedges Exposed in Tunnels. Symposium of the ISRM, Procedia Engineering 191, pp. 802-810.

- Maiolino S., Pellet F. (2015). Full scale lab testing for the determination of rock bolt contribution to reinforced joint shear strength. ISRM 2015, Montreal.
- Pellet F. (1993). Résistance et déformabilité des massifs rocheux stratifiés renforcés par des ancrages passifs. Thèse n° 1169, EPFL, 202 pages.
- XP P94-444, Roches (2002). Essais statiques d'arrachement sous un effort axial de traction d'un ancrage scellé dans un massif rocheux. Essai par paliers. Agence française de normalisation, La Plaine Saint-Denis.
- XP P94-424, Roches (2003) - Cisaillement direct selon une discontinuité de roche - Essai sous un effort constant, normal à la surface de discontinuité. Agence française de normalisation, La Plaine Saint-Denis.
- Protection contre les instabilités rocheuses, dimensionnement et exécution des boulons (2017). Collection Références, Cerema, ISBN 978-2-37180-175-2, 55 pages.
- NF EN 1990/A1 (2006). Eurocode – Base de calcul des structures. Agence française de normalisation, La Plaine Saint-Denis.
- ISRM Turkish National Group (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring : 1974-2006. Editors R.Ulusay and J.A. Hudson.
- NF EN 1997-1/A1 (2014). Eurocode 7 : Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales. Agence française de normalisation, La Plaine Saint-Denis.