

Office fédéral des routes

1.

DOCUMENTATION

Domaine ouvrages d'art

Danger naturel « Chutes de pierres » pour les routes nationales

Vérification des galeries existantes

Vérifications générales



Edition 2004



Documentation

Danger naturel « Chutes de pierres » pour les routes nationales

Vérification des galeries existantes

Vérifications générales

Impressum

Auteurs

Joseph Jacquemoud, ing. dipl EPFL, dr. sc. techn., Bureau Dr. Jean Pralong + Ass. sa, Sion
Raphael Mayoraz, géol. dipl. UNIFR, dr. sc. EPFL, Canton VS et CREALP, Sion

Collège d'experts

Michel Donzel, ing. dipl. ETHZ, OFROU, Berne
Heinrich Figi, ing. dipl. ETHZ, Tiefbauamt Kanton GR, Coire
Hugo Raetzo, geogr. dipl. UNIFR, OFEG, Bienne
Willi Schuler, ing. dipl. ETHZ, OFROU, Berne

Editeur

Office fédéral des routes OFROU, Division Infrastructure routière, Domaine Ouvrages d'art, 3003 Berne

Lieu, date

Berne, 2004

Téléchargeable comme fichier pdf sous: www.astra.admin.ch

© "ASTRA" 2004, reproduction autorisée avec citation de la source.

Table des matières

1.	CADRE GENERAL.....	7
1.1	INTRODUCTION	7
1.2	OBJET ET BUT	7
1.3	INTERVENANTS	7
1.4	DELIMITATION DES OUVRAGES	8
2.	METHODE DE VERIFICATION	9
2.1	DEROULEMENT DE LA VERIFICATION GENERALE	9
2.2	PHASE A : Données de la surveillance	9
2.3	PHASE B : Présence du danger chutes de pierres.....	9
2.4	PHASE C : Stop (arrêt précoce de la vérification)	10
2.5	PHASE D : Evaluation des falaises	10
2.6	PHASE E : Appréciation du danger potentiel.....	11
2.7	PHASE F : Evaluation de la galerie	11
2.8	PHASE G : Appréciation de la protection existante	11
2.9	PHASE H : Vérification	12
2.10	PHASE J : Qualification de la situation	12
2.11	DOCUMENTS.....	13

Annexe 1 : Diagramme de déroulement "Vérification générale"

Annexe 2 : Méthodologie d'évaluation des falaises, CREALP

Annexe 3 : Méthodologie d'évaluation de la galerie

Annexe 4 : Diagrammes "Danger potentiel" – "Robustesse galerie" – "Capacité d'absorption"

1. CADRE GENERAL

1.1 INTRODUCTION

Suite au rapport final du Groupe d'Experts OFROU [1], il a été décidé de mettre en œuvre les actions proposées. La vérification des galeries de protection existantes sur les routes nationales constitue l'une de ces actions (action F2 selon [1]) et est lancée en première priorité.

Cette note donne la marche à suivre pour la réalisation du premier pas, soit les vérifications générales des galeries.

Une méthodologie particulière, en partie qualitative, a dû être développée pour ces vérifications générales. De ce fait, et selon les dispositions de la directive SIA 462 /ch. 2.4, elle a été validée par un collège d'experts composé d'ingénieurs et de géologues expérimentés.

1.2 OBJET ET BUT

Les ouvrages à vérifier sont les galeries de protection contre les avalanches et les galeries de protection contre les chutes de pierres inscrites dans l'inventaire des centres de charges de la route nationale.

Le but de la vérification générale prévue est de qualifier les galeries de protection existantes quant à l'adéquation entre les dangers potentiels auxquels elles sont exposées et la capacité de résistance (robustesse) qu'elles possèdent effectivement.

Cette vérification doit permettre à l'OFROU de détecter des situations critiques éventuelles et de fixer les priorités pour les interventions qui se révéleront nécessaires.

Les principes de vérification sont partiellement qualitatifs, afin d'atteindre dans un délai le plus court possible les objectifs cités ci-dessus.

1.3 INTERVENANTS

Les vérifications générales demandées seront réalisées par les cantons en tant que Maître de l'ouvrage et direction de projet.

Elles nécessitent l'intervention dans tous les cas d'un géologue et d'un ingénieur. L'ampleur du travail nécessaire pour la vérification d'une galerie est évaluée en moyenne à 1 jour de travail pour l'ingénieur et 2 jours de travail pour le géologue, hormis le temps éventuellement nécessaire pour l'acquisition des documents de base et la coordination avec le maître d'ouvrage.

Il est impératif de restreindre le nombre de spécialistes à un nombre minimum de 1 à 2 groupes "Géologue-Ingénieur" par canton, pour garantir les plus hautes cohérence et homogénéité des appréciations .

1.4 DELIMITATION DES OUVRAGES

Sous la dénomination « galerie » on comprend ici un tronçon homogène quant au type de structure porteuse et quant au type de dangers potentiels en paroi. Un ouvrage répertorié sous un numéro d'ouvrage unique peut donc nécessiter un découpage plus détaillé et comporter plusieurs tronçons distincts à évaluer.

METHODE DE VERIFICATION

2.1 DEROULEMENT DE LA VERIFICATION GENERALE

La vérification est à réaliser selon le diagramme de déroulement donné en Annexe 1. Les phases successives définies dans ce diagramme sont explicitées et commentées ci-après.

2.2 PHASE A : Données de la surveillance

Intervenants : MO (Canton / responsable des ouvrages d'art)

Bases : Dossier d'ouvrage; KUBA-DB

Commentaires :

Le MO rassemble et met à disposition de l'Ingénieur et du Géologue les documents disponibles sur chaque ouvrage à vérifier, soit

- 1 type de structure : esquisse d'ouvrage A3 ou A4
- 2 état de la structure : dernier rapport d'inspection principale et év. rapport(s) de(s) vérification(s) effectuée(s)
- 3 plan de sécurité / convention d'utilisation : données disponibles sur les bases du projet quant aux actions prises en compte pour le dimensionnement; cas échéant extraits y relatifs de la note de calcul de l'auteur du projet
- 4 toutes données disponibles sur les événements répertoriés ou potentiels, telles que cadastres, rapports d'accident, notes internes, photos et cartes de danger
- 5 autres : en particulier les éventuels rapports de spécialistes avalanches et chutes de pierres établis lors du projet de construction ou ultérieurement ; cas échéant un géologue évaluera l'actualité d'anciens rapports ou de cartes de danger quant à leur qualité et leur représentativité de la situation actuelle.

2.3 PHASE B : Présence du danger chutes de pierres

Intervenant : Géologue

Bases : Données remises par le MO
Visite sur le site

Commentaires :

Constat de la présence ou de la potentialité d'activité de chutes de pierres d'une intensité pouvant être déterminante pour la résistance ultime de la galerie, ou non.

Pour des galeries contre avalanches massives par exemple, des événements d'une intensité correspondant à la chute libre de blocs de 50kg sur 50m de hauteur ou 100kg sur 20m de hauteur ne constituent pas a priori un cas de charge déterminant.

De même la présence de blocs importants roulant et glissant sur une pente moyenne ou faible n'est pas non plus déterminante.

2.4 PHASE C : Stop (arrêt précoce de la vérification)

Intervenants : Ingénieur et MO

Bases : Résultat de la phase B

Commentaires :

En l'absence de chutes de pierres considérées comme pouvant être déterminantes pour la galerie, la vérification est arrêtée à ce stade préalable.

Dans tous les cas ce résultat est à consigner dans la banque de données KUBA-DB et dans le dossier d'ouvrage.

2.5 PHASE D : Evaluation des falaises

Intervenant : Géologue

Bases : Données remises par le MO
Visite et relevés sur le site
Données propres du géologue

Commentaires :

L'évaluation demandée doit être systématique mais a un caractère préliminaire.

Si une évaluation fiable et représentative des falaises existe déjà, cette phase devient caduque et l'on passera directement à la phase « E » pour caractériser le danger potentiel selon les critères de l'annexe 4.

Il s'agit d'abord à ce stade de détecter les situations où des différences d'ordres de grandeur entre le danger en falaise et la capacité de l'ouvrage de protection existant sont flagrantes. Si ceci se trouve être le cas, une évaluation approfondie et complète des falaises sera établie dans une vérification détaillée ultérieure.

L'évaluation préliminaire n'a pas à être excessivement prudente faute d'investigations approfondies, mais doit être représentative et raisonnable. Les événements potentiels sont distingués selon leur probabilité d'occurrence et leur intensité.

La systématique d'évaluation, les éléments à définir, de même que la manière de prendre en compte des mesures de protection déjà existantes sont spécifiés dans la méthodologie établie par le CREALP et donnée en Annexe 2.

2.6 PHASE E : Appréciation du danger potentiel

Intervenant	:	Géologue
Bases	:	Résultat de la phase "D" Diagramme "Danger potentiel" (Annexe 4)
Commentaire	:	

Les évènements potentiels définis en phase D sont classés dans le diagramme de danger potentiel de l'Annexe 4, dans une classe "A" à "J" en fonction des ordres de grandeur de leur intensité (aux points d'impacts sur la galerie), et de leur probabilité d'occurrence.

Pour caractériser l'intensité, un paramètre nouveau désigné comme « facteur d'intensité » FI dimensionnel en [kg.m / s.m], a été défini en lieu et place du paramètre usuel « énergie » [kJ] qui n'est pas univoque mécaniquement pour les impacts sur des galeries.

Le classement effectué est motivé dans un commentaire succinct du géologue.

2.7 PHASE F : Evaluation de la galerie

Intervenant	:	Ingénieur
Bases	:	Données remises par le MO Visite de l'ouvrage et du site
Commentaire	:	

L'évaluation de la galerie vise à caractériser la résistance ultime sous charges verticales, à l'aide de paramètres globaux.

Les paramètres adoptés ont été choisis pour leur aptitude à refléter le comportement ultime des structures, leur "robustesse", sous des actions d'impacts.

La systématique d'évaluation et les paramètres à estimer sont spécifiés dans l'Annexe 3.

Ils ne nécessitent pas le recours aux données des plans d'exécution ni l'établissement de calculs statiques.

2.8 PHASE G : Appréciation de la protection existante

Intervenant	:	Ingénieur
Bases	:	Résultat de la phase F Diagramme "Robustesse galerie" Annexe 4
Commentaires	:	

Les galeries sont classées dans le diagramme de robustesse de la galerie de l'Annexe 4, en fonction des ordres de grandeur de leur capacité de résistance et de leur capacité constructive.

Le classement effectué est motivé dans un commentaire succinct de l'ingénieur.

2.9 PHASE H : Vérification

Intervenants	:	Géologue et ingénieur
Bases	:	Appréciation danger potentiel établie en phase E Appréciation protection existante établie en phase G Diagramme "Capacité d'absorption" Annexe 4

Commentaires :

Les classes de dangers potentiels en falaises (classes A à J) et de robustesse de la galerie existante (classes I à IV) sont mises en relation pour déterminer l'effet de protection de la galerie.

Le diagramme « capacité d'absorption » de l'Annexe 4 attribue à chaque classe de robustesse de la galerie l'événement maximum pour lequel la galerie, toujours dans les ordres de grandeur, présente une protection efficace.

Le jugement ainsi effectué est à motiver dans un bref commentaire commun du géologue et de l'ingénieur. La prise en compte éventuelle d'aspects particuliers favorables ou défavorables dans l'évaluation du danger potentiel et de la robustesse de la galerie sont à signaler.

2.10 PHASE J : Qualification de la situation

Intervenants	:	Géologue, ingénieur et MO
Bases	:	Résultats des appréciations et de la vérification

Commentaires :

La méthodologie donnée ici a été élaborée pour la vérification d'un ensemble de galeries sur le réseau.

Le géologue et l'ingénieur établissent d'abord une proposition de qualification de la situation pour chaque galerie, ainsi qu'une proposition de principe pour la suite à donner. Ensuite ces propositions sont discutées avec le MO (Ingénieur + Géologue du canton).

La qualification de la situation est donnée sur la base des critères et qualificatifs suivants:

- bonne / acceptable : situation où la capacité d'absorption est, selon le diagramme de l'Annexe 4, clairement, raisonnablement, ou juste satisfaite
- détériorée : situation où la capacité d'absorption est insuffisante de une ou deux classes de danger potentiel
- mauvaise / alarmante : situation où la capacité d'absorption est insuffisante de trois classes ou plus de danger potentiel.

Le MO établit alors avec l'appui de ses mandataires, une liste de priorités sur la base des qualifications effectuées. Il signale dans cette liste les mesures déjà en projet ou en cours de travaux.

Les propositions pour la suite à donner prennent en compte tous les types de mesures envisageables selon ch. 10, 11 et 13 du rapport [1]. Elles mentionnent les besoins et les objectifs d'une éventuelle vérification détaillée.

Lorsque la situation est qualifiée de "mauvaise / alarmante" les mesures à prendre sont soit de caractère urgent, soit de caractère pressant. La situation est alarmante et les mesures urgentes principalement lorsque les insuffisances sont majeures pour les dangers de fréquence élevée.

Les mesures urgentes sont essentiellement des mesures actives en paroi, des mesures de surveillance ou des restrictions de trafic. Elles doivent être mises en œuvre immédiatement et l'OFROU doit en être informé au plus tôt.

2.11 DOCUMENTS

Les documents suivants sont à établir :

- données sur l'ouvrage, ou la section d'ouvrage, évalué (no et réf. d'identification -esquisse A4 – charges de dimensionnement initial)
- ensemble des documents requis du géologue selon l'Annexe 2, pour les phases D et E
- motivation de l'ingénieur pour l'appréciation et le classement de la galerie selon phase « G » (une page A4 et diagramme de l'annexe 4)
- qualification finale de la situation, vue avec le MO, selon phase « J », avec propositions pour la suite à donner
- liste récapitulative avec priorités d'interventions et types préférentiels de mesures de protection.

Le canton transmettra à l'OFROU les documents récapitulatifs suivants :

- données d'identification de chaque ouvrage
- esquisses A4 ou A3 de chaque ouvrage
- diagrammes de l'annexe A4 (résultat de l'appréciation) pour chaque ouvrage
- liste récapitulative des qualifications effectuées pour l'ensemble des ouvrages et propositions du canton pour les suites à donner.

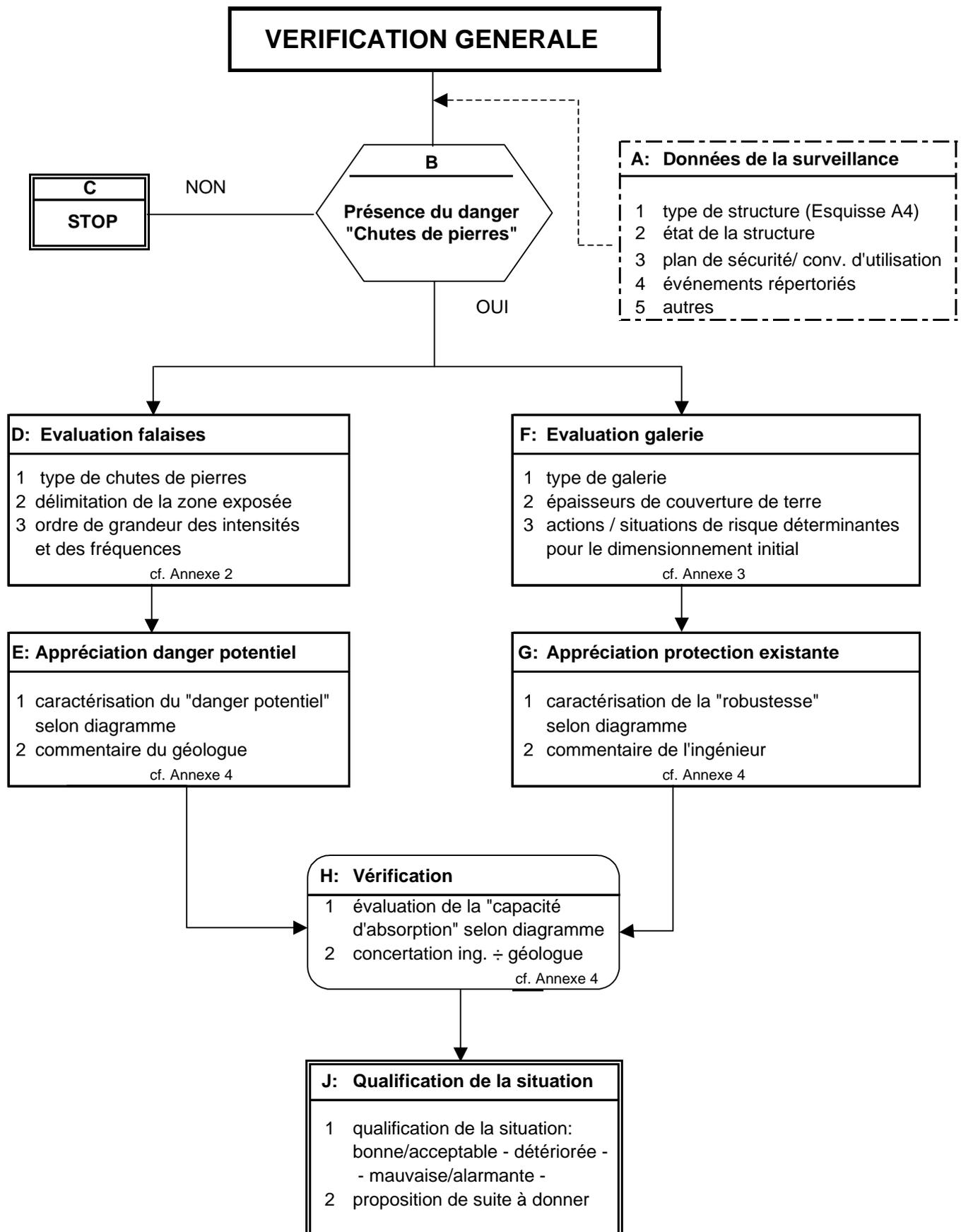
Sion / Berne, le 8 juillet 2004

[1] OFROU, Berne 2003 : Danger naturel "Chutes de pierres" pour les routes nationales, rapport final du Groupe d'Experts OFROU, www.astra.admin.ch/html/fr/downloads/

Annexe 1	: Diagramme de déroulement "Vérification générale"
Annexe 2	: Méthodologie d'évaluation des falaises, CREALP
Annexe 3	: Méthodologie d'évaluation de la galerie
Annexe 4	: Diagrammes "Danger potentiel" – "Robustesse galerie" – "Capacité d'absorption"

Annexe 1

Diagramme de déroulement "Vérification générale"



Annexe 2

Méthodologie d'évaluation des falaises, CREALP

Phase D: Evaluation des falaises

1. Références

- [1] OFEFP et al., 1997: Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. Recommandations.
- [2] ROUILLER, J.-D. et al. 1998: Pentcs instables dans le pennique valaisan, MATTEROCK: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels. Rapport final du PNR 31. vdf. 239 p.
- [3] Programme Interreg II C – « Falaises », Méditerranée Occidentale et Alpes Latines (2002): Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises; confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin.

2. Notes sur la terminologie

- Le terme générique "pierre" englobe aussi bien les pierres que les blocs.
- Pour des raisons pratiques, la limite de volume entre le terme de chute de pierre et éboulement est fixée conventionnellement dans ce cadre à 100 m³.
- Le vocabulaire spécifique est conforme au lexique Crealp consultable sous www.crealp.ch.

3. Bases théoriques

Les bases théoriques de la procédure reposent essentiellement sur les méthodes citées en références [2,3]. La qualification du danger potentiel d'un aléa telle qu'elle doit être effectuée en phase E nécessite la caractérisation de:

- la dangerosité (appelée aussi "probabilité de mobilisation" ou de "rupture" dans la littérature): probabilité que des blocs se détachent de la paroi ou roulent sur une pente (remobilisation)
- la probabilité d'atteinte: probabilité qu'un ou des blocs atteignent la galerie
- la probabilité d'occurrence qui est la combinaison de la dangerosité et de la probabilité d'atteinte
- l'intensité: l'énergie des blocs atteignant la galerie traduite en terme de vitesse par rapport au rayon moyen des blocs, pour les besoins spécifiques de la vérification générale des galeries.

La combinaison de la probabilité d'occurrence et de l'intensité permet de qualifier le degré de danger.

En d'autres termes:

Qualification de la probabilité d'occurrence

$$\begin{array}{l} \text{Dangerosité de l'aléa} \\ + \\ \text{Probabilité d'atteinte de la galerie} \end{array} = \text{Probabilité d'occurrence de l'aléa par rapport à la galerie}$$

Qualification du degré de danger

$$\begin{array}{l} \text{Probabilité d'occurrence} \\ + \\ \text{Intensité de l'aléa au niveau de la galerie} \end{array} = \text{Degré de danger représenté par l'aléa au niveau de la galerie}$$

4. Procédure

4.1. Information géologique de base

Une description lithologique succincte de la paroi est requise.

4.2. Analyse structurale et géomécanique

L'analyse structurale et géomécanique est nécessaire pour toute falaise rocheuse.

Il s'agit de l'auscultation de toute forme de linéament (joint) qui affecte une paroi. **Seules les discontinuités qui ont un rôle essentiel dans la déstabilisation doivent être décrites.** Leurs caractéristiques sont présentées sous forme de tableau (cf. exemple ci-dessous):

Famille	Azimut	Pendage	Persistance [m] (optionel)		Espacement [m] optionel	Ouverture [mm]		Ondulation rugosité	Remplissage / eau	Remarques
			moy.	max	moyen	moy.	max			
S ₁	279-330	16-20	50	50	8	5	100	faible	aucun	Fortement érodée
J1	040-060	55-90	20	60	5	10	1000	moy.	terre	Découpe intensément la roche

Documents requis:

- tableau descriptif des structures : seuls les paramètres qui ont un rôle évident dans la déstabilisation des blocs doivent être décrits
- stéréogramme de Schmidt-Lambert (hémisphère supérieure) comprenant les structures principales, l'orientation de la topographie, les principaux dièdres de glissement
- éventuellement, pour les cas les plus dangereux, un commentaire sur les principaux dièdres ou plans de glissement/basculement possibles.

Remarques:

Dans les cas où l'accès aux falaises est difficile, on se contentera d'une observation à distance.

4.3. Aléas et dangerosité

Les aléas à décrire sont:

- les aléas ponctuels: compartiments facilement individualisables et susceptibles de se détacher de la paroi
- les aléas diffus: parois comprenant tout une série de petits compartiments potentiellement instables, de volume, de mécanisme de mobilisation et de dangerosité semblables, dont l'individualisation serait fastidieuse
- les compartiments de grand volume représentant un potentiel d'éboulement ou d'écroulement.

La description doit être suffisamment complète pour permettre de qualifier la dangerosité (faible, moyenne, élevée). Il convient de se concentrer sur les aléas qui, représentent le plus grand danger et de ne pas s'attarder sur les aléas de moindre importance.

Les caractéristiques des aléas sont présentées sous forme de tableau (cf. exemple ci-dessous).

l'évènement potentiel.

Pour l'évaluation de la probabilité d'atteinte, on tient également compte:

- des possibilités de fractionnement des blocs lors de leur chute
- le cas échéant, de la nature et de l'âge des éboulis dominant la galerie (degré d'activité, taille

Aléa	Discontinuités concernées	Type de mécanisme	Vol. max par événement [m ³]	Taille des blocs [m ³]	Facteur déclenchant probable	Dangerosité
R1	J ₉ , J'4, J1	Glissement profond	5'000	2	pression hydrostatique	Faible
R4	J ₉ -S ₁ (dièdre), J3	Glissement superficiel	200 (1'000)	0.25	altération	Moyenne
R5	J ₁ , J'4, S ₁	Basculement	100	1	gel-dégel	Elevée

On distingue les mécanismes de mobilisation suivant: glissement profond, glissement superficiel sur un ou plusieurs plans (dièdres), basculement, rupture de surplomb, remobilisation de blocs, tassement, flambage, fauchage, etc.

L'évaluation de la dangerosité des aléas doit tenir compte de l'agencement structural, du degré d'activité "chutes de pierres" (par observation sur le terrain et/ou par consultation du cadastre des événements), de l'état d'altération des discontinuités et des masses instables, de leur perméabilité, de la présence/absence de facteurs favorisant le déclenchement (eau, gel/dégel), etc.

Pour les aléas diffus, on tiendra compte également de la fréquence observée ou probable d'évènements significatifs. Cette fréquence permet de déterminer directement la dangerosité selon les règles suivantes:

- Fréquence < 5 ans → dangerosité élevée
- 5 ans < Fréquence < 100 ans → dangerosité moyenne
- 100 ans < Fréquence → dangerosité faible

Attention: Ces limites sont spécifiques à la présente application pour la vérification générale des galeries, et différentes de celles proposées dans les recommandations fédérales qui prévoient des périodes de retour de 30,100 et 300 ans [1]. Le choix de la limite à 5 ans est motivé par la fréquence des inspections des ouvrages de protection effectuées selon les directives de l'OFROU en la matière.

Documents requis:

- Tableau descriptif des aléas: les informations fournies par le tableau descriptif sont suffisantes;
- Carte des aléas avec délimitation du secteur couvert par l'étude;
- Photo(s) panoramique(s) avec localisation des aléas;
- Photos des aléas les plus importants.

4.4. Probabilité d'atteinte et d'occurrence, intensité

- La **probabilité d'atteinte** est évaluée sur la base d'observations de terrain (blocs éboulés) et sur une estimation de la propagation probable des blocs potentiellement mobilisables. A cet effet, le choix d'un bloc de dimensionnement représentatif doit être effectué avec le plus grand soin, de manière à ne pas surévaluer la distance de propagation et, ultérieurement, l'intensité de des blocs)
- des capacités d'absorption d'énergie des terrains sur lesquels les blocs rebondissent
- de la présence de forêt (état du secteur boisé, densité, diamètre des troncs, type(s) d'arbre)
- de la trajectoire, la position, le volume et la forme des blocs déjà éboulés
- de la distribution spatiale et de la nature des impacts sur le sol et dans les arbres

- le cas échéant, de la présence d'ouvrages de protection existants ; une description des ouvrages ainsi qu'une évaluation de leur efficacité est alors nécessaire.

En raison du temps d'investigation limité, la vérification générale des galeries ne prévoit pas d'analyse de propagation basée sur une simulation trajectographique numérique. Cette approche est réservée à la vérification détaillée.

La **probabilité d'occurrence** est déterminée pour chaque aléa à partir de la dangerosité et de la probabilité d'atteinte selon la matrice suivante:

		Probabilité de mobilisation (dangerosité de l'aléa)		
		élevée	moyenne	faible
Probabilité d'atteinte	élevée	élevée	moyenne	faible
	moyenne	moyenne	faible	-
	faible	faible	-	-

L'**intensité** est évaluée en fonction des dommages observables sur le terrain et/ou à partir de calculs simples tenant compte de la masse des blocs potentiellement mobilisables (choix d'un bloc de dimensionnement adéquat), de la hauteur de chute et, si la trajectoire n'est pas verticale, d'un facteur de perte d'énergie (coefficient de frottement). Le bloc de dimensionnement est naturellement le même que celui utilisé pour évaluer la probabilité d'atteinte.

En raison du temps d'investigation limité, la vérification générale des galeries ne prévoit pas de calcul d'intensité basée sur une simulation trajectographique numérique. Cette approche est réservée à la vérification détaillée.

Pour les besoins spécifiques de la vérification générale des galeries, et afin de pouvoir combiner l'évaluation du degré de danger avec la robustesse de la galerie, l'intensité est exprimée sous forme d'un "facteur d'intensité" qui tient compte de la vitesse du bloc, de son angle d'impact par rapport à la galerie et de son rayon moyen. La procédure suivante doit être appliquée:

- Calcul de l'énergie **E** du bloc de dimensionnement au niveau de la galerie:

$$E = mghf \quad [\text{kJ}]$$

m = masse du bloc [t]

g = 9.81

h = hauteur de chute [m]

f = coefficient de frottement (en cas de chute libre = 1, sinon 0.9, ou 0.8, ...).

- Calcul de la vitesse verticale **V_z** du bloc au niveau de la galerie:

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \quad [\text{kJ}]$$

$$V = \sqrt{(2E / m)} \quad [\text{m/s}]$$

$$V_z = V \sin\alpha \quad [\text{m/s}]$$

V = vitesse de translation [m/s]

α = angle d'impact du bloc arrivant sur la galerie par rapport à l'horizontale (90° dans le cas d'une chute verticale) [degrés]. Cet angle ne tient pas compte de la pente du toit de la galerie.

3. Calcul du facteur d'intensité **FI**:

$$FI = mV_z / r$$

r = rayon moyen du bloc de dimensionnement [m]

On distingue 3 degrés de facteur d'intensité:

- FI > 55 → élevé
- 20 < FI < 55 → moyen
- FI < 20 → faible

Pour des facteurs FI supérieurs à 100 ou 110 les galeries ne constituent en général plus un type de protection efficace et raisonnable.

Pour les éboulements, le facteur d'intensité est toujours élevé.

Le cas échéant, l'évaluation de l'intensité doit tenir compte de la présence d'ouvrages de protection existants. Ceux-ci doivent être décrits et leur efficacité évaluée.

Documents requis:

- description (photos) des observations de terrain et commentaires relatifs à la probabilité d'atteinte
- au cas où cela est significatif, photos et carte des impacts et des blocs éboulés
- le cas échéant, commentaires spécifiques à l'évaluation de la probabilité d'occurrence
- le cas échéant, commentaires et photos sur les dommages observables et sur les conséquences pour l'évaluation de l'intensité
- évaluation du facteur d'intensité selon la procédure décrite sous forme de tableau (cf. exemple ci-dessous)
- évaluation de la probabilité d'atteinte, de la probabilité d'occurrence et du facteur d'intensité pour chaque aléa sous forme de tableau récapitulatif (cf. exemple ci-dessous).

Exemple de tableau d'évaluation du facteur d'intensité

Aléa	Bloc de dimensionnement [m ³]	Masse [t]	Hauteur de chute [m]	Coefficient de frottement	Angle d'impact [degrés]	Rayon moyen [m]	Intensité		
							Energie [kJ]	Vitesse verticale [m/s]	Facteur d'intensité
R1	2	5.4	20	0.9	70	0.8	953	17.6	119.20
R4	0.25	0.675	7	0.8	55	0.4	37	8.6	14.50
R5	1	2.7	10	1	45	0.65	265	9.9	41.10

Exemple de tableau récapitulatif pour chaque aléa

Aléa	Dangerosité	Probabilité d'atteinte	Probabilité d'occurrence	Facteur d'intensité
R1	Faible	Moyenne	Faible	Elevé
R4	Moyenne	Elevée	Moyenne	Faible
R5	Elevée	Elevée	Elevée	Moyen

Phase E: Evaluation du danger potentiel

1. Introduction

Les références, la terminologie ainsi que les bases théoriques sont définies en phase D (cf. Phase D: chapitres 1, 2, 3).

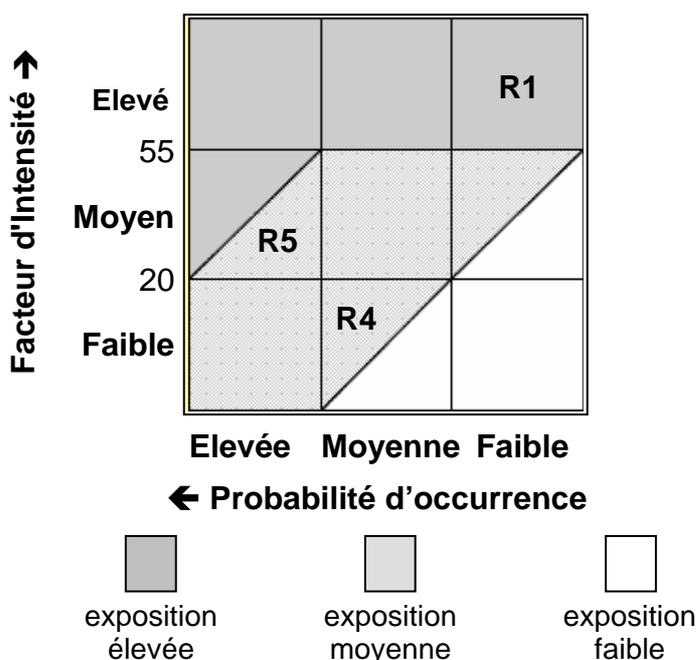
2. Procédure

2.1. Degré d'exposition

Le danger que représente chaque aléa au niveau de la galerie est déterminé en fonction du facteur d'intensité et de la probabilité d'occurrence, selon le diagramme FI / P ci-dessous.

Du fait de la spécificité des paramètres et des valeurs limites utilisées ici pour l'évaluation des galeries, l'expression usuelle "degré de danger" est substituée par "degré d'exposition" pour éviter des assimilations abusives.

Diagramme « facteur d'intensité/probabilité » (FI / P)



Documents requis:

- Diagramme facteur d'intensité/probabilité selon annexe 4, avec positionnement de chaque aléa.

2.2. Classe de danger potentiel

En vue de la détermination de la protection offerte par la galerie existante, le degré d'exposition déterminé par le diagramme FI / P pour chaque aléa est traduit en classe de danger potentiel selon la matrice ci-dessous:

Matrice de détermination de la classe de danger potentiel

A	B	C
D1	E	F1
D2		F2
G	H1	J
	H2	

Sur cette base, on attribue chaque aléa à une classe de danger potentiel. Exemple:

Aléa	Probabilité d'occurrence	Facteur d'intensité FI	Classe de danger potentiel
R1	Faible	119.2	C
R4	Moyenne	14.5	H1
R5	Elevée	41.1	D2

Documents requis:

- Détermination de la classe de danger potentiel pour chaque aléa selon le diagramme ad hoc, avec un bref commentaire du classement effectué ; une présentation sous forme de tableau est suffisante.

2.3. Commentaires, remarques et conclusions

Les observations de terrain, la qualification des différents paramètres permettant de déterminer le degré d'exposition et la classe de danger potentiel nécessitent quelques commentaires pour justifier le classement effectué.

Un mot de conclusion concernant l'appréciation générale du danger pour la galerie est également indiqué. Ce chapitre permet également de signaler la présence de dangers potentiels autres que les chutes de pierres et éboulements tels que les coulées boueuses et les laves torrentielles.

Annexe 3

Méthodologie d'évaluation de la galerie

Phase F : Méthodologie d'évaluation de la galerie

La "robustesse" est définie comme l'aptitude d'une galerie à résister à des impacts de blocs.

La robustesse est établie en fonction de deux paramètres :

- la capacité constructive (CC)
- la capacité de résistance (CR)

La valeur CC est obtenue par combinaison linéaire de deux sous-paramètres :

- la classe de structure CLS
- la classe de couverture CLC

La détermination de ces paramètres et sous-paramètres est à réaliser comme suit :

a) Classe de structure (CLS)

Elle dépend du type de galerie selon son système porteur, comme suit :

- CLS = 3 : pour les dalles pleines massives en béton, sur murs et piliers, avec ou sans sommiers de bords
 pour les voûtes armées épaisses
- CLS = 2 : pour les dalles épaisses sur poutres et sommiers en béton, préfabriqués ou non
 pour les voûtes non armées ou minces
- CLS = 1 : pour les systèmes de poutres et sommiers préfabriqués en béton ou en acier, avec dalle mince.

Des dispositions ou systèmes particuliers sont à évaluer par l'ingénieur, par analogie. En présence de points faibles reconnus, principalement quant à la ductilité de la structure, le CLS sera diminué jusqu'à 1 point.

b) Classe de couverture (CLC)

Elle dépend de l'épaisseur de la couche de couverture de protection sur la toiture :

- CLC = 3 : pour une couverture de terre d'épaisseur moyenne supérieure à 1.0 m
- CLC = 2 : pour une couverture de terre d'épaisseur moyenne inférieure à 1.0 m mais supérieure à 0.50 m
- CLC = 1 : pour une couverture de terre ou autre, d'épaisseur moyenne de 0.50 m ou moins.

Des dispositions ou systèmes particuliers sont à évaluer par l'ingénieur, par analogie.

c) Capacité constructive (CC)

La caractéristique CC se détermine de la manière suivante :

$$CC = CLS + CLC$$

Le résultat est classé comme suit :

- capacité constructive élevée : $CC > 4$
- capacité constructive moyenne : $CC = 4$
- capacité constructive faible : $CC < 4$

d) Capacité de résistance (CR)

La caractéristique CR est établie en fonction des actions de poids propre, de couverture de terre ou autres et d'actions variables, prises en compte au dimensionnement initial de la galerie (essentiellement actions dans le sens vertical).

CR est défini par

$$CR = \max \{ (0.3 G_k + 0.3 G_{E k} + 1.5 Q_k) ; (0.3 G_k + 0.5 G_{E k} + 1.3 Q_k) \}$$

avec : G_k : valeur caractéristique du poids propre

$G_{E k}$: valeur caractéristique des surcharges permanentes

Q_k : valeur caractéristique des actions variables.

Ces actions sont à quantifier comme charges réparties par m^2 . Les charges concentrées (Q_{conc}) sont à transformer en charges réparties équivalentes ($q_{réparti}$) sur un panneau de toiture, produisant un moment positif principal en travée identique.

Par exemple pour une dalle infiniment longue, de portée L et appuyée continuellement sur les deux bords, on obtient l'équivalence :

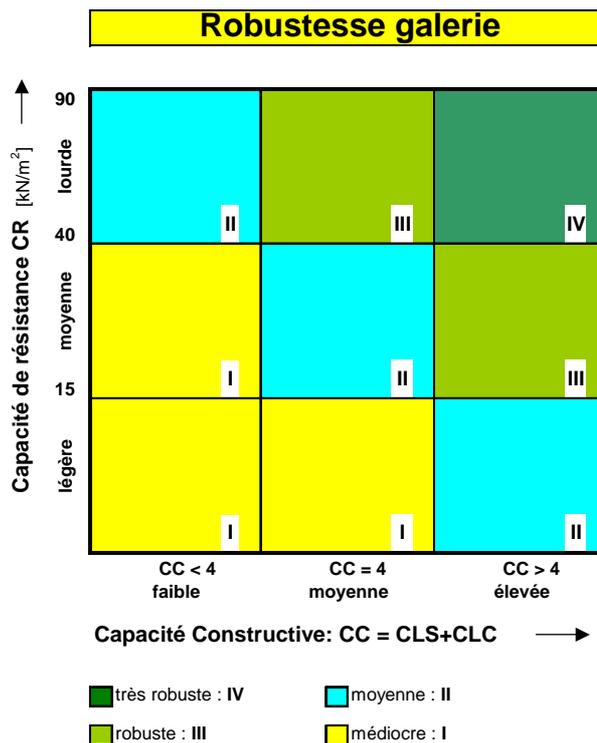
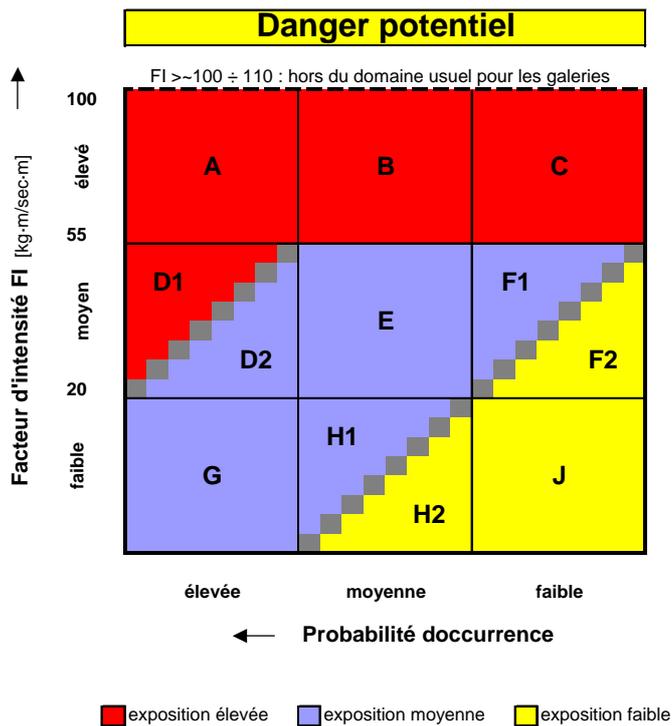
$$q_{réparti} = (8 \times Q_{conc}) / (4 \times L^2)$$

Le résultat est classé comme suit :

- capacité de résistance lourde : $CR \geq 40 \text{ kN/m}^2$
- capacité de résistance moyenne : $15 < CR < 40 \text{ kN/m}^2$
- capacité de résistance légère : $CR \leq 15 \text{ kN/m}^2$

Annexe 4

Diagrammes "Danger potentiel" – "Robustesse galerie" – "Capacité d'absorption"



Une galerie de robustesse donnée (I à IV) est une protection efficace face aux dangers potentiels prévus (de " X " à " J)

Robustesse IV protège contre dangers potentiels A à J

Robustesse III protège contre dangers potentiels C à J

Robustesse II protège contre dangers potentiels D à J

Robustesse I protège contre dangers potentiels G à J

Par exemple: une galerie de robustesse " III " soumise à des dangers potentiels d'occurrence élevée de classe "G", d'occurrence moyenne de classe "E" et d'occurrence faible de classe "C", constitue une protection efficace.

